



№2-2025

ISSN 1999-9429

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Перспективы применения робототехнических комплексов
- Системы управления и моделирование
- Связь, навигация и наведение
- Техническое зрение

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС77-28889 от 12.07.2007

*Федеральная служба по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи
и охраны культурного наследия*

Научно-технический и прикладной журнал

Издается с 1995 года, до середины 2007 года под названием «Известия ТРТУ»

Подписной индекс ПС704

№ 2 (244). 2025 г.

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Редакционный совет

Курейчик В.В. (гл. редактор); Кравченко Ю.А. (зам. гл. редактора); Бородянский И.М. (ученый секретарь); Абрамов С.М.; Агеев О.А.; Бабенко Л.К.; Боженюк А.В.; Борисов В.В.; Веселов Г.Е.; Гайдук А.Р.; Горбанёва О.И.; Еремеев А.П.; Зинченко Л.А.; Каляев И.А.; Касьянов А.О.; Коноплев Б.Г.; Коробейников А.Г.; Куповых Г.В.; Левин И.И.; Массель Л.В.; Медведев М.Ю.; Мельник Э.В.; Никитов С.А.; Обуховец В.А.; Панич А.Е.; Петров В.В.; Пшихопов В.Х.; Редько В.Г.; Румянцев К.Е.; Сергеев Н.Е.; Середин Б.М.; Сидоркина И.Г.; Стемповский А.Л.; Сухинов А.И.; Турулин И.И.; Тютиков В.В.; Угольницкий Г.А.; Целых А.Н.; Юханов Ю.В.

Учредитель Южный федеральный университет.

Издатель Южный федеральный университет.

Ответственный за выпуск Косенко Е.Ю.

Технический редактор Ярошевич Н.В.

Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Дата выхода в свет 04.04. 2025 г. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 26,2. Уч.-изд. л. – 17,5.

Заказ № . Тираж 250 экз.

Адрес издателя: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. 8(863)243-41-66.

Адрес типографии: Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ. 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. 8(863)243-41-66.

Адрес редакции: 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 22, ЮФУ, тел. +7 (928) 909-57-82, e-mail: iborodyanskiy@sfedu.ru, <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.

16+

Цена свободная

ISSN 1999-9429 (Print)

ISSN 2311-3103 (Online)

© Южный федеральный университет, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В.К. Абросимов, Г.А. Долгов, Е.С. Михайлова МОДЕЛЬ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ УКЛОНЕНИЯ РОЯ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ АНТОГОНИСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ.....	6
М.А. Астапова ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ В ЗАДАЧЕ СЕГМЕНТАЦИИ НОР ГРЫЗУНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБОКИХ СВЕРТОЧНЫХ АРХИТЕКТУР	19
И.Л. Житяев, М.С. Картель, Ю.Ю. Житяева, А.А. Авакян, В.А. Смирнов ИССЛЕДОВАНИЕ МЕМРИСТИВНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР С ПРОФИЛИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОДОМ ДЛЯ НЕЙРОМОРФНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ.....	30
З.В. Нагоев, О.З. Загазежева, К.Ч. Бжихатлов, И.А. Мамбетов РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СБОРА УРОЖАЯ.....	40
А.М. Корсаков, В.В. Иванова, А.А. Демчева, В.Д. Матвеев, Е.Ю. Смирнова ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ СЦЕНАРИЯ РАБОТЫ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОМОРФНОГО МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ ЗАДАНИЕМ.....	51
А.А. Кочкаров, А.К. Куликов, В.А. Ольхова, А.Н. Рыбак, А.С. Стахмич ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА РАННЕГО ОПОВЕЩЕНИЯ И МОНИТОРИНГА РАСТЕНИЙ	61
М.И. Бесхмельнов, Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев ГИБРИДНЫЙ МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ КОНФИГУРАЦИИ МАРШРУТА НА КАРТЕ МЕСТНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЧАСТИЧНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ....	68
А.М. Маевский, И.А. Печайко, М.А. Алексеев, Н.М. Буров РАЗРАБОТКА РОБОТИЗИРОВАННОГО ИМИТАТОРА ПОДВОДНОГО АППАРАТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБОВ АВТОНОМНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕЗИДЕНТНЫХ АНПА С ОБЪЕКТАМИ ПОДВОДНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ	83
В.П. Носков, Ю.С. Баричев, О.П. Гойдин, А.Н. Курьянов РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ ВИДЕО-ДАЛЬНОМЕТРИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ РОБОТОВ ВОЗДУШНОГО И НАЗЕМНОГО ПРИМЕНЕНИЯ.....	96
И.А. Пшенокова, К.Ч. Бжихатлов, М.А. Каноква МУЛЬТИАГЕНТНАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПАРКОВОЧНЫХ МЕСТ В ИНФРАСТРУКТУРЕ ГОРОДА	108
Е.Ю. Смирнова, Д.К. Серов, Д.К. Пельменев, Н.П. Коренко, А.Ю. Никулина МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БИОМОРФНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ.....	118
С.М. Соколов, А.А. Богуславский МЕТОДИКА И ПРАКТИКА ПОВЫШЕНИЯ АВТОНОМНОСТИ НАЗЕМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ	129
Н.М. Чернышов, И.К. Романова-Большакова МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТА ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ С РОБОТИЗИРОВАННЫМИ СИСТЕМАМИ	140
Е.Д. Григорьева, В.А. Ушаков МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ СВОЕВРЕМЕННОЙ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРУППИРОВКИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ	151

РАЗДЕЛ II. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

А.Н. Карапеев, Е.Ю. Косенко, М.Ю. Медведев, В.Х. Пшихопов ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ МЕТОДА ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ.....	162
Л.А. Рыбак, Д.И. Малышев, Д.А. Дьяконов, А.А. Мамченкова ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ПРИ НАЛИЧИИ СТАЦИОНАРНЫХ И ПОДВИЖНЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ	175
А.Ю. Тамм, Е.А. Барымова, М.И. Кузьмин ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СПАЙКОВОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ И МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ РТК	185
Ф.А. Хуссейн, В.А. Костюков ГИБРИДНЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ МНОГОАГЕНТНОЙ ЗАДАЧИ КОММИВОЯЖЁРА	193

РАЗДЕЛ III. СВЯЗЬ, НАВИГАЦИЯ И НАВЕДЕНИЕ

В.А. Головской, А.В. Винокуров МОДЕЛЬ ПОДСИСТЕМЫ ВЫРАБОТКИ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ КЛЮЧЕЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.....	202
В.Д. Матвеев, А.Е. Архипов, И.С. Фомин РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СЕМАНТИЧЕСКОЙ СЕГМЕНТАЦИИ RTC-SAM ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ НА ПУТИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА.....	212
Б.В. Павлов, Д.А. Гольдин, Е.А. Третьякова МОДЕЛИ ИЗМЕРЕНИЙ БОРТОВЫХ МАГНИТОГРАДИЕНТНЫХ СИСТЕМ	221
А.А. Черкасова, А.Ю. Шатилов САМОПОДСТРАИВАЮЩАЯСЯ МНОГОКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА СЛЕЖЕНИЯ ЗА ФАЗОЙ СИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ	229

РАЗДЕЛ IV. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ

Ю.К. Грузевич, Ю.Н. Гордиенко, П.С. Альков, Д.В. Волков, М.С. Ходаковская БОРТОВАЯ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНАЯ СИСТЕМА ПОДВОДНОГО ВИДЕНИЯ ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА «ВОЗДУХ-ВОДА».....	241
Н.В. Ким, Н.Е. Бодунков, Д.С. Гиренко, Н.А. Ляпин, Н.В. Удалова ВИЗУАЛЬНАЯ НАВИГАЦИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕМАНТИЧЕСКИХ ОПИСАНИЙ МЕСТНОСТИ	256
С.В. Кулешов, А.В. Кваснов, А.А. Зайцева, А.Л. Ронжин КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ ПО ЕСТЕСТВЕННЫМ ОРИЕНТИРАМ ДЛЯ БПЛА, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ НЕДОСТУПНОСТИ ГНСС.....	269
К.А. Суминов, Н.А. Бочаров, М.А. Кирилук ОЦЕНКА АППАРАТНОГО СОСТАВА БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ РЕШАЕМЫХ ЗАДАЧ.....	279
Д.В. Шумков, И.В. Титков, П.А. Гулевич ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В ИНТЕРЕСАХ РАДИОМОНИТОРИНГА	289

CONTENT

SECTION I. PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF ROBOTIC SYSTEMS

V.K. Abrosimov, G.A. Dolgov, E.S. Mikhailova MACHINE LEARNING MODEL OF SWARM EVASION FROM THE INFLUENCE OF ANTAGONISTIC ENVIRONMENT	6
M.A. Astapova INTELLIGENT CONTROL OF ROBOTICS AT RODENT BURROW SEGMENTATION USING DEEP CONVOLUTIONAL ARCHITECTURES.....	20
I.L. Jityaev, M.S. Kartel, Yu.Yu. Jityaeva, A.A. Avakyan, V.A. Smirnov INVESTIGATION OF MEMRISTIVE NANOSCALE STRUCTURES WITH PROFIED INTERFACEFOR NEUROMORPHIC ELECTRONICS	30
Z.V. Nagoev, O.Z. Zagazheva, K.Ch. Brzhihatlov, I.A. Mambetov DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT ROBOTIC HARVESTING SYSTEM	40
A.M. Korsakov, V.V. Ivanova, A.A. Demcheva, V.D. Matveev, E.Yu. Smirnova ORGANIZING THE EXECUTION OF A MOBILE ROBOT OPERATION SCENARIO USING A NEUROMORPHIC TASK MANAGEMENT MECHANISM	51
A.A. Kochkarov, A.K. Kulikov, V.A. Olhova, A.N. Ribak, A.S. Stacmich AN INTELLIGENT PLANT MONITORING AND EARLY WARNING SYSTEM BASED.....	61
M.I. Beskhmelnov, B.K. Lebedev, O.B. Lebedev HYBRID METHOD OF ROUTE CONFIGURATION PLANNING ON A TERRAIN MAP UNDER CONDITIONS OF PARTIAL UNCERTAINTY	69
A.M. Mayevskiy, I.A. Pechayko, M.A. Alekseyev, N.M. Burov DEVELOPMENT OF AN UNDERWATER VEHICLE ROBOTIC SIMULATOR TO STUDY METHODS OF RESIDENT AUVs AUTONOMOUS INTERVENTION WITH UNDERWATER INFRASTRUCTURE OBJECTS	83
V.P. Noskov, Y.S. Barichev, O.P. Goydin, A.N. Kuryanov DEVELOPMENT AND ANALYSE VISUAL NAVIGATION SYSTEM FOR AIR AND GROUND-BASED ROBOTS	96
I.A. Pshenokova, K.Ch. Brzhikhatlov, M.A. Kanokov MULTI-AGENT INTELLIGENT SYSTEM FOR CONTROL OF PARKING SPACES IN CITY INFRASTRUCTURE	109
E.Y. Smirnova, D.K. Serov, D.K. Pelmenev, N.P. Korenko, A.Y. Nikulina MODEL-BASED BIOMORPHIC UNDERWADER ROBOTS SYSTEM CONTROL DESIGN	118
S.M. Sokolov, A.A. Boguslavsky METHODOLOGY AND PRACTICE OF INCREASING THE AUTONOMY OF GROUND-BASED ROBOTIC COMPLEXES.....	130
N.M. Chernyshov, I. K. Romanova-Bolshakova OBJECT IDENTIFICATION METHOD FOR INTEGRATION WITH ROBOTIC SYSTEMS	141
E.D. Grigorieva, V.A. Ushakov MODEL AND ALGORITHM OF OPERATIONAL PLANNING OF LOGISTIC PROCESSES OF TIMELY DELIVERY OF CARGO WITH THE INTERACTION OF A GROUP OF ROBOTIC COMPLEXES	151

SECTION II. CONTROL AND MODELING SYSTEMS

A.N. Karapeev, E.Y. Kosenko, M.Yu. Medvedev, V.Kh. Pshikhopov RESEARCH OF AN INTELLIGENT ADAPTIVE CONTROL ALGORITHM BASED ON THE REINFORCEMENT LEARNING METHOD	162
L.A. Rybak, D.I. Malyshev, D.A. Dyakonov, A.A. Mamchenkova A GENETIC ALGORITHM FOR PLANNING THE TRAJECTORY OF A GROUP OF MOBILE ROBOTS IN THE PRESENCE OF STATIONARY AND MOBILE OBSTACLES	175

A.Yu. Tamm, E.A. Barymova, M.I. Kuzmin STUDY OF THE APPLICATION OF THE SPIKING NEURAL NETWORK AND FINITE ELEMENT METHOD FOR DIAGNOSTICS OF ROBOT ASSEMBLIES...	186
---	-----

F.A. Houssein, V.A. Kostyukov HYBRID METHOD FOR SOLVING THE MULTI-AGENT TRAVELING SALESMAN PROBLEM.....	194
--	-----

SECTION III. COMMUNICATION, NAVIGATION AND GUIDANCE

V.A. Golovskoy, A.V. Vinokurov A MODEL OF A SUBSYSTEM FOR GENERATING CRYPTOGRAPHIC KEYS OF THE CYBERPHYSICAL SYSTEM INFORMATION PROTECTION SYSTEM	202
--	-----

V.D. Matveev, A.E. Arkhipov, I.S. Fomin COMBINING SEGMENTATION, TRACKING, AND CLASSIFICATION MODELS TO SOLVE VIDEO ANALYTICS PROBLEMS	212
--	-----

B.V. Pavlov, D.A. Goldin, E.A. Tretyakova MEASUREMENT MODELS OF ON-BOARD MAGNETOGRADIENT SYSTEMS.....	221
---	-----

A.A. Cherkasova, A.Y. Shatilov MULTYCHANNEL ADAPTIVE PHASE LOCK LOOP SYSTEM FOR GNSS RECEIVER	230
--	-----

SECTION IV. MACHINE VISION

Yu.K., Gruzevich, Yu.N. Gordienko, P.S. Alkov, D.V. Volkov, M.S. Khodakovskaya ONBOARD ACTIVE-PULSE UNDERWATER VISION SYSTEM THROUGH THE AIR-WATER BOUNDARY	241
--	-----

N.V. Kim, N.E. Bodunkov, D.S. Girenko, N.A. Lyapin, N.V. Udalova VISUAL NAVIGATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES USING SEMANTIC TERRAIN DESCRIPTIONS.....	257
--	-----

S.V. Kuleshov, A.V. Kvasnov, A.A. Zaytseva, A.L. Ronzhin MULTIPURPOSE APPROACH TO VISUAL NAVIGATION BASED ON LANDSCAPES FOR UAVS OPERATING IN GNSS-UNAVAILABLE CONDITIONS	269
---	-----

K.A. Suminov, N.A. Bocharov, M.A. Kirilyuk ASSESSMENT OF THE HARDWARE COMPOSITION OF ONBOARD COMPUTING SYSTEMS OF ROBOTIC COMPLEXES BASED ON THE TASKS BEING SOLVED.....	279
---	-----

D.V. Shumkov, I.V. Titkov, P.A. Gulevich APPLICATION OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS FOR TECHNICAL OBJECT RECOGNITION IN THE INTERESTS OF RADIO MONITORING.....	289
---	-----

Раздел I. Перспективы применения робототехнических комплексов

УДК 004.085

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-6-19

В.К. Абросимов, Г.А. Долгов, Е.С. Михайлова

МОДЕЛЬ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ УКЛОНЕНИЯ РОЯ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ АНТОГОНИСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Одним из приоритетных направлений теории группового управления на близлежащую перспективу является роевое управление группами малых беспилотных летательных аппаратов – микро-, мини- и нано- классов, выполняющих коллективную задачу в условиях воздействия противника. Здесь сталкиваются две антагонистические стратегии-минимизации потерь с точки зрения атакующего роя и максимизации таких потерь с точки зрения системы обороны. Цель исследования: разработка подхода к решению практической задачи – проникновения роя беспилотных летательных аппаратов на охраняемый системой обороны объект. Задачи исследования заключались в анализе характеристик факторов, влияющих на процессы обнаружения, сопровождения, распознавания намерений роя системой обороны и разработка модели машинного обучения создания пространственно-временных формаций, минимизирующих число пораженных системой обороны элементов роя. В качестве основных параметров системы обороны выделены дальность обнаружения и продолжительность распознавания роя, время на принятие решения по действиям роя, размер зоны поражения средств обороны. В качестве метода исследования выбран метод машинного обучения на сверточных нейронных сетях с подкреплением. Эффект противодействия системе обороны создается за счет динамичности роя; он может активно маневрировать, создавая в процессе осуществления миссии пространственно-временные маневры. Для моделирования ситуации «Рой vs Система обороны» вводится агент роя (нейронная сеть с архитектурой трансформера, которая иницирует формации роя) и агент системы обороны, которая распознает рой и атакует его, создавая зону поражения в условном центре масс роя. Рой руководствуется стохастическим правилом, предлагая системе обороны (среде) отреагировать на его маневр. Среда отвечает атакой роя, образуя поражающий фактор в той точке, в которой предположительно окажется рой или основная часть роя. Наградой стратегии роя выступает число неуничтоженных объектов в условиях выполнения ограничений; для системы обороны эта «награда» выступает как «наказание». В процессе машинного обучения установлено интересное явление: каждый элемент роя, оставаясь в рамках заданного пространства и реализуя биологические принципы роевого управления без Лидера самостоятельно уклоняется от области поражения, что в совокупности создает случайную для средств обороны пространственно-временную формацию с минимальными потерями элементов роя. Таким образом, методом машинного обучения с подкреплением создана модель, позволяющая варьировать поведением роя и синтезировать пространственно-временных формации, затрудняющие обнаружение, сопровождение, распознавание намерений и принятие решений по воздействию системы обороны на рой атакующих малых беспилотных летательных аппаратов, а также существенно снизить их потери.

Группа; рой; беспилотный летательный аппарат; формация; оборона; машинное обучение с подкреплением.

V.K. Abrosimov, G.A. Dolgov, E.S. Mikhailova

MACHINE LEARNING MODEL OF SWARM EVASION FROM THE INFLUENCE OF ANTAGONISTIC ENVIRONMENT

One of the priority areas of group control theory for the near future is swarm control of groups of small unmanned aerial vehicles - micro-, mini- and nano-classes, performing a collective task under enemy influence. Here, two antagonistic strategies collide - minimization of losses from the point of view of the attacking swarm and maximization of such losses from the point of view of the defense system. Re-

search objective: development of an approach to solving a practical problem - penetration of a swarm of unmanned aerial vehicles into an object protected by a defense system. The objectives of the study were to analyze the characteristics of the factors influencing the processes of detection, tracking, recognition of swarm intentions by the defense system and the development of a machine learning model for creating spatio-temporal formations that minimize the number of swarm elements affected by the defense system. The main parameters of the defense system are the detection range and duration of swarm recognition, the time to make a decision on the actions of the swarm, the size of the zone of destruction of defense means. The method of machine learning on convolutional neural networks with reinforcement was chosen as the research method. The counteraction effect against the defense system is created due to the swarm's dynamics; it can actively maneuver, creating spatio-temporal maneuvers during the mission. To simulate the "Swarm vs. Defense System" situation, a swarm agent (a neural network with a transformer architecture that initiates swarm formations) and a defense system agent are introduced that recognizes the swarm and attacks it, creating a zone of destruction in the conventional center of mass of the swarm. The swarm is guided by a stochastic rule, asking the defense system (environment) to react to its maneuver. The environment responds by attacking the swarm, creating a damaging factor at the point where the swarm or the main part of the swarm is expected to be. The reward of the swarm strategy is the number of undestroyed objects under the conditions of constraints; for the defense system, this "reward" acts as a "punishment". An interesting phenomenon was established in the process of machine learning: each swarm element, remaining within a given space and implementing the biological principles of swarm control without a Leader, independently evades the area of destruction, which together creates a random spatio-temporal formation for defense means with minimal losses of swarm elements. Thus, using the method of machine learning with reinforcement, a model was created that allows varying the behavior of the swarm and synthesizing spatio-temporal formations that complicate detection, tracking, recognition of intentions and decision-making on the impact of the defense system on a swarm of attacking small unmanned aerial vehicles, as well as significantly reducing their losses.

Group; swarm; unmanned aerial vehicle; formation; defense; machine learning with reinforcement.

Введение. В последнее время активно расширяется спектр методов и сфера применения групп беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Наряду с такими традиционными миссиями как разведка, логистика и др. рассматриваются коллективные задачи БЛА по организации радиосвязи, ведению радиоэлектронной борьбы, пеленгации источников радиоизлучения, построения систем предупреждения и др. Но особенно важная роль, как показал опыт специальной военной операции на Украине, принадлежит задачам ударного воздействия БЛА. Очень широкое распространение получили БЛА-«камикадзе» [1, 2].

Удешевление стоимости композитных материалов, реализуемый тренд на миниатюризацию конструкции и в целом размеров беспилотных летательных аппаратов, развитие методов группового управления роевыми группами [3, 4] позволяет значительно увеличивать количественный состав разведывательно-ударной группы БЛА – до нескольких десятков и более объектов. В литературе на роевые образования возлагается все большее количество задач, включая связь, сбор данных и разнообразные вычисления с группированием роя по функциональности отдельных объектов, местоположению и др. [5]. При этом рой может быть гетерогенным, состоять из элементов, обладающих различным размером, функционалом, выполняющим различные роли и др. [6]. Рой таких БЛА, таким образом, становится настоящей новой, инновационной боевой единицей в тактическом звене.

Атака ударных БЛА, тем более в составе группы, в которую могут включаться как ударные, так и ложные БЛА (для увеличения мощности и насыщения роя), в силу ограниченных возможностей систем ПВО чрезвычайно опасна для любой критической инфраструктуры. В связи с этим особое внимание стало уделяться созданию средств борьбы с БЛА. Борьба с БЛА и группами БЛА включает взаимосвязанные процессы обнаружения, сопровождения, распознавания, идентификации, принятия решения, перехвата управления (при необходимости и возможности), прицеливания и воздействия. Средства обороны от БЛА уже сейчас выделяются в отдельные системы вооружения, которые получили пока еще неофициальное название «Система противодронной обороны» (ПДО).

Основные положения теории противодронной обороны, как новой научной проблемы борьбы с нарождающимся новым типом в определенном смысле даже стратегического перспективного вооружения, еще только формулируются. В этом контексте возникли две актуальные симметричные задачи:

а) построения системы ПДО от беспилотных летательных аппаратов (отдельных и следующих в составе группы, стаи, роя различного типа, вида базирования и назначения)

б) разработки стратегий решения различных боевых задач одиночными и группами беспилотных летательных аппаратов в условиях наличия ПДО.

Рамки настоящей работы ограничиваются вопросами преодоления ПДО беспилотниками малого класса (мини- микро- и нано-БЛА). Их характерными особенностями являются крайне незначительные геометрические и отражательные характеристики. Поэтому мощные российские системы войсковой ПВО, создаваемые для других целей, оказываются слабо эффективными в вопросах обнаружения и распознавания БЛА малого класса, демонстрируют низкую вероятность поражения даже пушечным вооружением при высоком расходе боезапаса и др. [7, 8]. Рой же таких БЛА по стоимости не превосходит нескольких сотен тысяч рублей. Решение различных военно-технических задач такими роями существенным образом зависит от технологий, используемых при построении системы ПДО, а также от стратегий действий БЛА, как одиночных, так и особенно коллективных.

Весь комплекс задач по выполнению роями малых БЛА (МБЛА) различных миссий (разведка, логистика, проникновение на охраняемый объект (задача «диффузной бомбы»), обеспечивающие миссии и др.) сводится к задачам планирования, решаемым с использованием методов оптимизации, эвристик, машинного обучения, искусственного интеллекта и др. [9]. В настоящей работе исследование направлено на разработку метода формирования эффективной стратегии поведения роя в области ответственности ПДО. В последующих публикациях будут представлены решения по организации взаимодействия в роях по информации и управлению для осуществления таких стратегий.

Краткий обзор разработок по созданию и испытаниям роевых структур за рубежом. Разработкам по созданию и испытаниям групповых (роевых) структур и связанных с ними программном и техническом обеспечении в интересах решения военно-технических задач за рубежом уделяется повышенное внимание уже более десяти лет [10, 11]. Инициатором таких работ явилось известная инновационная структура США DARPA [12].

В апреле 2023 года США, Великобритания и Австралия провели учения, в ходе которых в рой были объединены беспилотники Blue Bear Ghost и Insitu CT220, наземные роботы Viking, самоходная артиллерийская установка FV433 Abbot, а также танк Challenger 2, бронемашины Warrior и БМП OT-90 [13].

Компания ShieldAI (Калифорния, США) провела демонстрационный полет группы беспилотных самолетов V-Bat Teams. Испытания проводились в сотрудничестве со специальным подразделением BBC AFWERX. Роем управляло программное обеспечение Nivemind. Разрабатываемая новая система роев дронов V-Bat Teams планируется использовать в проекте Replicator [14].

Проводится разработка перспективного беспилотного летательного аппарата Perdix [15]. Одноразовые малые БЛА летят на предельно малых высотах, в том числе и в роевой группе, и могут быть использованы как средство разведки или атаки. Аппараты, образующие рой, способны принимать коллективные решения, адаптировать формацию к поставленным задачам в режиме реального времени. Место сбитых объектов, обеспечивающих ту или иную функциональность, занимают другие объекты роя. Функциональность роя сохраняется даже в случае потери большинства элементов. Каждый БЛА взаимодействует с другими, все аппараты «равноправны», рой свободно масштабируется. Дроны будут находиться в кассетах и запускаться с борта самолета. Внешние обводы беспилотников Perdix создаются с помощью 3D-печати: обеспечивается быстрое производство и низкие цены аппаратов.

В 2016 году осуществлялась разработка тактики защиты так называемого «ценного военно-морского актива» (авианосца) от роя малых беспилотных катеров [16].

Есть и другие программы, в том числе Low-Cost UAV Swarming Technology (технология быстрого запуска беспилотных летательных аппаратов для подавления и уничтожения противника), «Гремлина» (многоцелевые беспилотники X-61A) и др.

Характерной особенностью публикаций относительно разработки и испытаний роевых структур в зарубежных армиях являются фрагментарность и неконкретность сообщений, их явно рекламный характер, выводы о принципиальной успешности испытаний и непубличность конкретных решений. Вместе с тем, применительно к группам БЛА, можно выделить несколько, хотя и частично спорных, используемых подходов к решению задач преодоления ПДО.

Ключевым направлением преодоления систем ПДО группами БЛА считается подлет малоразмерных БЛА к целям с минимально возможными интервалами и дистанциями между собой. Проблема безопасного автономного полета решается алгоритмами обеспечения нестолкновения объектов друг с другом. Однако проблема высокой плотности, создающая высокую уязвимость роя, здесь не рассматривается, хотя имеет место.

БЛА должны иметь возможность взаимодействия друг с другом, образуя информационную сеть для перераспределения боевых задач в быстро меняющейся обстановке, в том числе в случае выведения из строя некоторых БЛА.

Правильный выбор цели группой считается в настоящий момент одной из главных проблем.

Определяющим в боевом применении групповых (в частности, роевых) структур является дешевизна БЛА, в частности за счет использования технологии 3D-печати, и доступность его компонент.

В целом, объем открытых зарубежных публикаций по исследованию различных аспектов использования роевых структур по решению разнообразных гражданских и военно-технических задач только за последние 2-3 года почти на два порядка превышает число отечественных публикаций. Указанное отставание, к сожалению, нарастает.

Анализ характеристик влияющих факторов внешней антагонистической среды. Системы обороны важных объектов являются сложными техническими системами, состоящими из множества различных по составу, структуре и характеристикам подсистем, обеспечивающих обнаружение, распознавание и нейтрализацию (уничтожение) целей. В настоящее время разработано множество вариантов ее исполнения, основанных на различных физических принципах – акустике, оптике, теплового излучения, радиолокации и др. К наиболее распространенным требованиям к системам противоракетной обороны относятся требования обнаружения целей на значительных расстояниях (десятки километров) в максимально большой зоне обзора (по азимуту 360 град, по углу места – до 60 град, по высоте – до 10-15 км.) с устойчивым сопровождением во всём диапазоне скоростей целей (от 3-5 до 30+ м/сек), высокой вероятностью идентификации целей (ошибка первого рода – не более 2-3%).

Анализ показывает, что в конфликтной ситуации «Рой-ПДО» эффективность системы обороны определяется следующими основными факторами:

1. Дальность обнаружения роя. Способы обнаружения МБЛА и противодействия им, возможности, их преимущества и проблемы подробно проанализированы в монографии [17] Определяющим для обнаружения роя является его малозаметность в оптическом и радиолокационном спектре. В совокупности воспринимаемые глазом объемные размеры роя становятся сравнимыми с размерами крупных объектов, и рой в 100 и более БЛА обнаруживается как группа, подобная стае птиц [18]. Но отдельные микро- и нано- БЛА на высотах до 300 м оптикой могут быть обнаружены только на очень малых дальностях - около 500–700 м, (при наблюдении сбоку) и около 200-400 м при наблюдении полета БЛА навстречу, а мини-БЛА- до 2-3 км. При совмещении оптических и электронных методов обнаружения возможности обнаружения увеличиваются до 5–14 раз, до дальностей 6...8+ км. Расчетные максимальные дальности обнаружения отдельных малых БЛА (ЭПР – эффективная поверхность рассеивания $\sim 0,01 \text{ м}^2$) радиолокационными станциями различного диапазона составляют для 0,1 – 1,4 (минимум) ... 1,5..2,8 (максимум) км [19].

Итак, на расстояниях до 8-10 км плотный рой МБЛА будет с высокой вероятностью обнаруживаться как единый объект. Отдельные объекты, образующие рой, при их самостоятельном перемещении, как обладающие низкой ЭПР (не выше 0.01-0.05), будут устойчиво обнаруживаться только на меньших дальностях – до 2-3 км. Нижняя граница обнаружения МБЛА по высоте составляет не менее 500 м.

Принципиально для захвата траектории объекта и выдачи целеуказания системе поражения каждый объект должен быть обнаружен N раз подряд. Если в процессе сопровождения уже обнаруженная цель не была обнаружена N раз подряд, то считается, что произошёл срыв сопровождения; цель теряется, алгоритм её обнаружения начинается заново [20]. Принципиально, по видимости, это положение будет справедливо и для обнаружения роев.

2. Продолжительность распознавания и идентификации роя. После того как рой обнаружен и если он движется под воздействием хорошо изученных сил и без каких-либо существенных маневров, то на основании последовательной фиксации его пространственно-временного состояния принципиально можно построить модель прогноза его движения. В такой ситуации распознавание плотного роя происходит за несколько секунд, так как соответствующие базы данных, включающие геометрию и сигнатуры объектов уже созданы в рамках работ по разработке систем ПВО. Имеющиеся в литературе характеристики приводятся для отдельных БЛА. Для роев таких характеристик на практике, в том числе полигонной, пока не получено.

Если в задачах обнаружения по ЭПР объект или группа только обнаруживаются, то есть фиксируется сам факт «есть-нет», то в задачах распознавания требуется объект/рой отнести к определенному классу. Для вопросов распознавания роев как компактных групп крайне важно значение имеет определение суммарной ЭПР группы.

По проведенным авторами оценкам [21] по объемным характеристикам и сигнатуре, формируемой как суммарная ЭПР, рой малых БЛА численностью около 100 объектов на дальностях до 10 км. может обнаруживаться как крупный потенциально опасный объект – крылатая ракета, небольшой самолет и др. Если же рой начинает маневрировать и нарушается его пространственная структура, например, при реализации разнообразных пространственно-временных маневров, за счет постоянного изменения объемных размеров, формы (прежде всего геометрии) роя, отражательных характеристик, то создается своего рода целенаправленная хаотичность, существенно затрудняющая возможность прогнозирования движения и, как следствие, намерений роя [21].

3. Время принятия решения по воздействию на рой. При обнаружении целей типа МБЛА на дальностях, не превышающих 3–8 км на высотах их полета 100–300 м, 10–20 км на высотах до 1000 м при скоростях не более 100 м/сек ведение эффективной стрельбы по БЛА перспективными зенитными средствами должно осуществляться с временами реакции, не превышающими нескольких секунд [19]. Так, например, ЗРК "БУК-М2Э", одновременно обнаруживаемый и обстреливаемый до 24 воздушных целей, имеет время реакции 10–12 с. Конечно же, этот вывод сделан для относительно высокоскоростных целей.

В случае плотного роя задача его поражения упрощается. Однако прямое отражение налета распределенного роя средствами ЗРК ПВО, по видимому, будет неоправданно экономически, во-первых, из-за использования дорогостоящих ракет по группе дешевых БЛА, а во-вторых, «...ведет к быстрому истощению боевого ресурса ЗРК и последующей их неспособности отразить последующий возможный удар авиации и высокоточного оружия...» [8].

4. Координаты точки (области) целеуказания средств воздействия на рой внутри геометрии роя, размер и геометрия зоны поражения, вероятность успешного воздействия. Основной причиной низкой эффективности для зенитной артиллерии является низкая плотность средств поражения (снарядов, пуль) в объеме пространства, окружающего БЛА (из-за рассеивания, обусловленного колебаниями ствола, платформы, на которой установлена установка, зависимостью внутренней баллистики от состояния и температуры ствола и др.). Для повышения эффективности поражения БЛА артиллерийским вооружением требуется использование инструментальных средств наведения и автоматического вычисления углов упреждения, так как определяющее значение для эффективности стрельбы оказывает место и точность прицеливания [7]. Приведем условный пример. Плотный рой в 100 объектов каждый размером в небольшой шарик диаметром 20 см и расстоянием безопасности, обеспечивающим нестолкновение в 20 см, следует к цели в виде куба со стороной чуть больше 1 м. Взрывом боеприпаса с поражающим действием в

виде шара радиусом 50 м, рой поражается, даже при крупных ошибках прицеливания. Более того, даже рой, включающий крупные БЛА самолетного типа (размер размаха крыла 1.5 м и расстояние безопасности 1.5 м) гарантированно уничтожаются боеприпасом как с круговым, так и секторным способом поражения. Но преобразованием роя в протяженную линию и равномерным распределением объектов на расстояниях даже в три-пять метра создается существенная неопределенность для точки прицеливания, а таким же боеприпасом уничтожается не более 20-30% мощности роя.

Итак, многочисленные особенности МБЛА (низкие значения тепловых и радиолокационных сигнатур ($\text{ЭПР} \leq 0,05 \text{ м}^2$), высоты полета (сотни метров), малые слышимость и визуальная заметность, незначительные скорости полета БЛА (до 10-30 м/с) не обеспечивают их надежный захват, селекцию и сопровождение современными РЛС, входящими в состав ЗРК. Средства поражения современных и перспективных сухопутных (морских) и авиационных комплексов ПВО не позволяют обеспечивать гарантированное поражение БПЛА, особенно малоскоростных и малоразмерных. Система ПДО поэтому должна разрабатываться специально.

В работах [22] обращается внимание на эффект, обеспечиваемый при правильной топологии роя с учетом постоянного изменения его структуры по мере того, как элементы роя перемещаются в пространстве, присоединяются или покидают рой и др. Обращается внимание и на проблемы, связанные с непредсказуемостью поведения гетерогенного роя [23]. Указанное позволяет выдвинуть гипотезу, связанную с тем, что непредсказуемое поведение роя, а именно, создание разнообразных непредсказуемых для противника роевых пространственно-временных формаций может существенно затруднить решение системой противодронной обороны всех основных задач, включая обнаружение, сопровождение, распознавание, идентификацию, принятие решения и активное воздействие на рой.

Модель машинного обучения с подкреплением. Существенным преимуществом выбранного метода построения модели противоборства «Рой-система ПДО» является отсутствие необходимости накопления значительно статистического материала (статистический подход), наличия допущений о знании стратегий поведения противника (антагонистический игровой подход), экспертизы о правильности выбора варианта (экспертный подход), значительного объема обучающей выборки (обучение с учителем). Здесь размечаемыми данными являются только ситуация и решение. В процессе обучения с подкреплением методом проб и ошибок одна обучаемая система взаимодействует с окружающей средой, получая ее реакцию и при правильном решении – «награду», скалярную величину, которая указывает на то, насколько успешно система справляется с задачей.

В качестве архитектуры модели машинного обучения взята трансформерная архитектура [24], впервые предложенная для задач обработки естественного языка. Q-обучение является методом обучения с подкреплением, основанным на концепции Q-функции (функции качества действия), которая оценивает ожидаемую совокупную награду за выбор действия a в состоянии s при следовании оптимальной стратегии π^* . Формально Q-функция определяется как:

$$Q(s', a') \leftarrow Q(s', a') + \alpha [R_{t-1} + \gamma \max_{a'} Q(s) - Q(s', a')],$$

где α – коэффициент обучения, чем он выше, тем сильнее агент доверяет новой информации, R_{t-1} – вознаграждение за предыдущий шаг, γ – коэффициент обесценивания (дисконтирования), чем он меньше, тем меньше агент предпочитает выгоду от своих будущих действий в пользу настоящего, s', a' – состояние и действие на предыдущем шаге, s – состояние на текущем шаге.

В реализации используется средняя квадратичная ошибка (MSE-loss) – фундаментальная функция потерь:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{target}^{(i)} - Q_{pred}^{(i)})^2.$$

Исходя из необходимости формирования пространственных маневров, метод Q-обучения применяется для выбора и обработки пространственно-временных зависимостей между БЛА.

Идея состоит в том, что рой является агентом, не только оказывающимся в прецедентной ситуации, но и формирующий такую ситуацию. Формирование новой прецедентной ситуации заключается в динамичности роя; он может активно маневрировать, создавая в процессе осуществления миссии пространственно-временные маневры. Рой руководствуется стохастическим правилом, предлагая системе ПДО (как интеллектуальной среде) отреагировать на его маневр. Реакция среды понятна – проанализировав и спрогнозировав некоторое время ситуацию, она отвечает атакой на рой, образуя поражающий фактор в той области, в которой предположительно окажется рой или основная его часть. Но рой распределен в пространстве, и, как для атакующей стороны, математический эффект от принятой стратегии маневрирования заключается в минимизации числа пораженных элементов роя, что может ассоциироваться с «наградой», для системы обороны это же число выступает как «наказание» на «неправильную» стратегию обстрела атакующего роя. Таким образом, понимание правильности решения обеспечивается знанием просто вычисляемого эффекта.

Метод обучения с подкреплением широко используется для обеспечения автономности в сетях [25, 26], оптимизации траекторий [27–30] и др.

Машинное обучение формированию стратегий действий роя в зоне ответственности системы обороны. Агентом роя W будем называть модель нейронной сети с архитектурой трансформер, которая делает «предсказания» нового положения роя для сохранения его элементов и формации. Для агента были определены следующие начальные параметры – число объектов, множество доступных формаций, размер пространства, шаг смещения объектов в пространстве, дистанция между элементами роя и максимальная дистанция от центра для обеспечения разроения.

Агентом ПДО будем называть алгоритм, «атакующий» рой. Он характеризуется зоной поражения роя с заданным радиусом в центре масс роя (центроид), которая рассчитывается с учетом времени принятия решения системой ПДО.

Термины «Агенты» здесь вводятся для удобства описания и рассматриваются просто как отдельные элементы алгоритма машинного обучения с подкреплением.

Вводится множество состояний $s \in S$, в которых реализуется прецедентная ситуация «Рой vs ПДО».

Определено множество действий роя A , из которых нужно производить выбор $a \in A$ на каждом шаге действий в пространстве S , выполняя миссию и противодействуя среде (системе ПДО). В силу неопределенности, присущей характеристикам системы ПДО, на каждом шаге процесса обучения Агент роя выбирает расположение объектов роя в рамках изначально заданной формы. В качестве примера рассмотрены: а) случайное распределение роя в заданном пространстве, б) две сферы, расположенные рядом, в) параллелепипед, г) простое вытянутое скопление, д) эллипсоид. Указанное имитирует исходную форму роя, образуемую специально и предположительно уменьшающую суммарную ЭПР роя для затруднения его обнаружения и выбор точки прицеливания средств ПДО в пространстве S действий роя [21].

Вводится условная геометрическая форма G (сфера, но также она может быть и параллелепипедом, направленным конусом и др.) заданного радиуса, описывающая область поражения при воздействии на рой. На каждом шаге процесса обучения эта сфера размещается в условном центре масс роя, что отражает влияние системы ПДО (среды) на рой и представляет собой результат атаки роя средствами поражения ПДО в предположении, что он обнаружен. Все объекты роя, попавшие внутрь шара, считаются «пораженными». Для контроля ведется подсчет «пораженных» и «действующих» элементов роя.

Вводится функция переходов P , которая задаёт изменение прецедентной ситуации после того, как в состоянии $s \in S$ было выбрано действие $a \in A$. В общем случае эта функция переходов имеет вид:

$$P(s_{t+1}|s_t, a_t) = \prod_{i=1}^N \mathcal{N}(s_t^i + a_t^i, \sigma^2),$$

где $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ – нормальное распределение с математическим ожиданием μ и дисперсией σ^2 , $\mu = s_t^i + a_t^i$ – ожидаемое положение объекта после применения действия, σ^2 – дисперсия, моделирующая шум перемещения.

Вводится функция награды $R_t: S \times A \rightarrow R$, выдающая скалярную величину за выбор действия a в состоянии s .

Функция вознаграждения на шаге t :

$$R_t = \sum_{i=1}^N \left[\begin{cases} h1, \text{ если } I(\|\vec{p}_i - \vec{c}\| < D), \\ h2, \text{ если } I(\|\vec{p}_i - \vec{G}\| < r_G), \\ h3, \text{ при приближении к границам} \end{cases} \right] - h4 \sum_{i < j} I(\|\vec{p}_i - \vec{p}_j\| < d_{min}),$$

где $h1$, $h2$, $h3$ и $h4$ – гиперпараметры награды (подбираются экспериментально), $\vec{p}_i$ – координаты i -го объекта в пространстве, $\vec{c} = \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N \vec{p}_i)$ – динамический центр роя (центр оид), D – заданное расстояние до центра роя, $\vec{G}$ – центр сферы области поражения и ее радиус r_G , $I(\dots)$ – это индикаторная функция, которая равна 1, если условие выполняется и 0, если нет, d_{min} – минимальное расстояние между соседними объектами, $i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$ – номера объектов в рое.

Результат действий роя W и системы (ПДО) оценивается вознаграждениями и штрафами. Каждый БЛА как объект роя W штрафуются по четырем основным признакам: а) за попадание внутрь сферы поражения G , б) удаление от центра роя D , в) за близость друг к другу d_{min} , и г) за приближение к границам допустимого пространства действий роя. Каждый агент роя вознаграждается за непопадание в область поражения G и одновременное нахождение в условном центре пространства всего роя W .

Целью Агента роя является получение максимального суммарного вознаграждения за выбранные действия всех объектов роя.

Целью Агента ПДО является нанесение максимального ущерба роя, в части создания ситуации, при которой максимальное число объектов роя попадают в зону поражения.

Итерационный процесс обучения осуществляется по следующему алгоритму.

Изначально задается прецедентная ситуация, в которой Агент роя W располагает случайным образом в заданном пространстве выбранной формации объекты роя.

Инициализация среды с выбранной формой. Задается требуемая пространственно-временная форма, к которой должен стремиться рой. В данной задаче Агент W выбирает из четырех возможных: случайное распределение роя в заданном пространстве, две сферы, параллелепипед, простое вытянутое скопление, эллипсоид.

Агент роя (нейронная сеть) выбирает направление смещения роя и следующую форму, где для каждой эпохи обучения формации определяются последовательно, а в процессе моделирования модель сама определяет оптимальную формацию.

Генерация действий a :

$$a = \begin{cases} \text{случайное с вероятностью } \epsilon \\ \arg \max_a Q(s_t, a), \text{ иначе} \end{cases}$$

обновление Q -функции через функцию переходов.

Рой смещается в выбранном направлении. При этом проверяются ограничения и должны выполняться условия для получения вознаграждения.

Агент системы ПДО условно обнаруживает рой, затрачивает условное время на его идентификацию и атакует рой.

На рис. 1-3 представлены отдельные результаты процесса обучения модели.

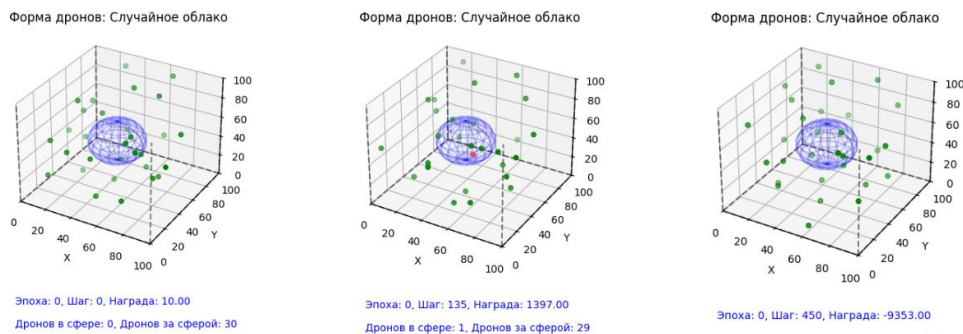


Рис. 1. Процесс обучения. Целевая формация: случайный рой

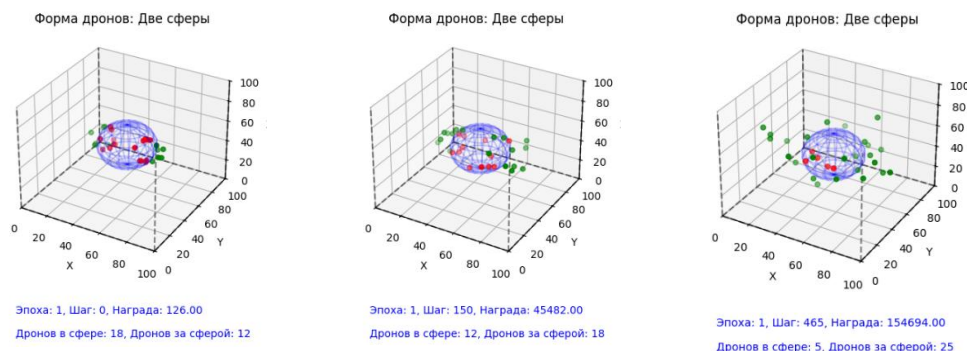


Рис. 2. Процесс обучения. Целевая формация: две сферы

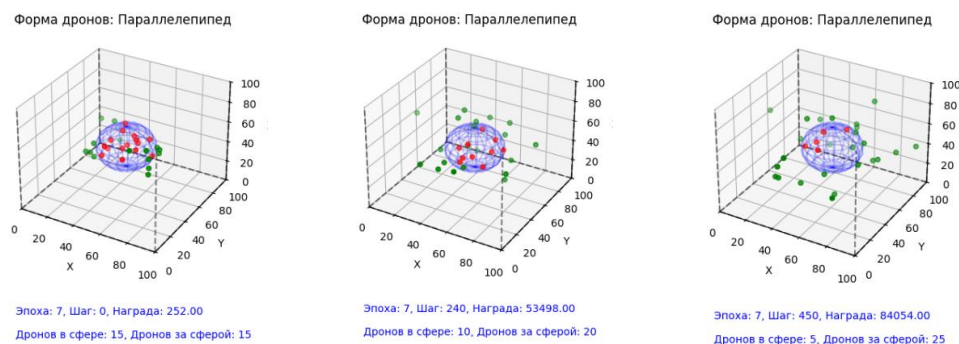


Рис. 3. Процесс обучения. Целевая формация: параллелепипед

Обсуждение результатов. Разработанная модель машинного обучения использует нейронную сеть с архитектурой типа трансформер, которая представлена на рис. 4.

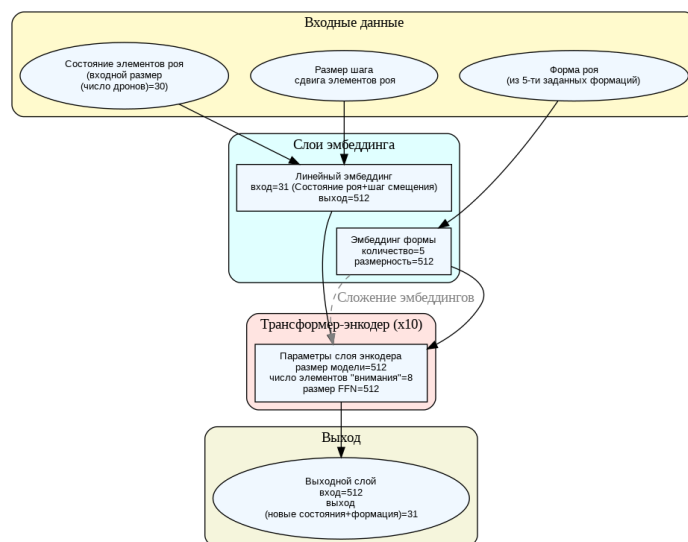


Рис. 4. Архитектура разработанной модели нейронной сети (для 30 элементов роя)

Число эпох обучения – 1000, шагов в эпохе – 500. Архитектура имеет следующие параметры: размерность входных/выходных векторов – 512, число голов внимания для параллельного анализа зависимостей – 8, количество слоев трансформера (глубина

модели) – 10, размер скрытого слоя внутри каждого трансформерного блока – 512. Для обучения были использованы: коэффициент дисконтирования будущих наград – 0.95. Начальная вероятность случайного действия (исследование) – 1.0, скорость уменьшения ϵ – 0.995, функция оптимизации обучения – Adam, с learning rate – 0.001. Эти параметры выбираются экспериментальным путем.

Для агента W были определены следующие начальные параметры – num_drones – 30 (число объектов), space_size – 100 (размер пространства), step_size – 2 (шаг смещения объектов в пространстве). Для агента ПДО «время на принятие решения» – sphere_update_interval – 50, радиус поражения сферы – sphere_radius – 20.

Обучение модели нейронной сети проводилось в онлайн платформе Google Collab в среде выполнения с графическим ускорителем NVIDIA Tesla T4. Время обучения с формированием изображений визуализации процесса каждые 100 шагов для 30 объектов роя и 1000 эпох составило примерно 2,5 часа. Продолжительность обучения существенно и, как выяснилось, нелинейно зависит от объема роя, для которого вырабатывается стратегия. Так, в частности для роя в 200 объектов время обучения составляет 13,8 часов, а для 300 объектов – уже 25 часов.

Итерационный процесс уже на 300-400 эпохах в принципе сходил к устойчивой фиксированной пространственной форме, когда элементы роя занимают наиболее выгодное с точки зрения получения награды положение и остаются в нем, без существенных изменений формы. Также были зафиксированы нестандартные исходы обучения, когда рой сбивался в один из углов пространства, пытаясь как бы уйти от области поражения (рис. 5).

В процессе машинного обучения установлено интересное явление: каждый элемент роя, оставаясь в рамках заданного пространства, самостоятельно уклоняется от области поражения, что в совокупности создает случайную для средств обороны пространственно-временную формацию с минимальными потерями элементов роя.

При мощности роя в 30 объектов численная величина потерь для различных формаций (случайное облако, две сферы, эллипсоид) не превосходила 5-8 объектов, т.е. не более 20-25%.

Форма дронов: Две сферы

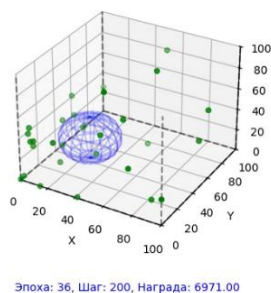


Рис. 5. Промежуточные результаты обучения

Таким образом, выбранная архитектура модели (трансформер) адекватно отражает конфликтную ситуацию «Рой против системы ПДО». Она позволяет:

- ♦ провести моделирование пространственно-временной формы роя и обработку взаимного положения между объектами для выбора оптимальной формации и траектории роя, при этом анализировать элементы роя как единый элемент получения вознаграждения и принятия решения;

- ♦ использовать вариативное количество объектов, параметров ПДО для получения различных результатов моделирования с целью последующего анализа и оценки пригодности модели.

В результате проведенных исследований установлены следующие проблемные вопросы использования для формирования стратегий поведения роя моделей машинного обучения с подкреплением:

- ♦ обучение модели нейронной сети занимает продолжительное время, на которое влияют как заданные параметры алгоритма, так и вычислительные мощности, с использованием которых оно проходит;

♦ требуется большее число ограничительных условий (наказаний и вознаграждений) для контролируемого и предсказуемого поведения модели.

Заключение. Стайное и роевое управление многочисленными группами (роями) беспилотных летательных аппаратов малых классов (микро-, мини- и нано-БЛА) позволяет с новых позиций решать разнообразные военно-технические задачи, в том числе проникновение на охраняемый объект, создания условий максимального расходования ресурса системы ПВО перед основным ударом и др. Актуальность исследований в этом направлении подтверждается и опытом специальной военной операции на Украине.

В работе рассмотрены вопросы формирования стратегий поведения роя в зоне ответственности систем обороны охраняемых объектов. Показано, что с учетом известного противоречия «средства нападения-средства защиты» эффективным способом преодоления противодронной обороны является создание специальных пространственно-временных роевых структур, затрудняющих все процессы, связанные с этим конфликтом – обнаружение, слежение, распознавание, идентификацию, принятие решений и воздействие на атакующий рой. Эффективной стратегией обороны является своевременное распознавание замысла атакующего роя и его атака с учетом предполагаемой хаотичности пространственно-временной структуры роя.

Разработана модель машинного обучения роя формированию стратегий действий в зоне ответственности системы обороны. Модель построена на сверточных нейронных сетях и использует метод глубокого обучения с подкреплением. С использованием такой модели возможно варьировать поведением роя и синтезировать пространственно-временные формации, затрудняющие обнаружение, сопровождение и принятие решений по воздействию системы обороны на рой атакующих малых беспилотных летательных аппаратов, а также существенно снизить их потери.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Радченко А. Барражирующие боеприпасы и способы борьбы с ними // Армейский сборник. – 2023. – № 9.
2. Афонин И.Е., Макаренко С.И., Петров С.В., Привалов А.А. Анализ опыта боевого применения групп беспилотных летательных аппаратов для поражения зенитно-ракетных комплексов системы противовоздушной обороны в военных конфликтах в Сирии, в Ливии и в Нагорном Карабахе // Системы управления, связи и безопасности. – 2020. – № 4. – С. 163-191. – DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10406.
3. Городецкий В.И. Поведенческие модели кибер-физических систем и групповое управление: основные понятия // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1 (203). – С. 144-162. – DOI: 10.23683/2311-3103-2019-1-144-162.
4. Боровик В.С. [и др.]. Коллективы интеллектуальных роботов. Сферы применения. Серия: “Интеллектуальные технические системы” (подсерия: “Когнитивная робототехника”) / под ред. В.И. Сырякина. – Томск: STT, 2018. – 140 с.
5. Huang W., Guo H., Liu J. Task Offloading in UAV Swarm-Based Edge Computing: Grouping and Role Division // in 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 7–11 Dec. 2021. – P. 1-6. – DOI: 10.109/ GLOBE COM46 510. 2021. 96859 20.
6. Zhu A., Lu H., Ma M., Zhou Z., Zeng Z. DELOFF: decentralized learning-based task offloading for multi-UAVs in U2X assisted heterogeneous networks // Drones. – 2023. – 7 (11), 656. – P. 1-31. – DOI: 10.3390/drones7110656.
7. Ростопчин В.В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния // Беспилотная авиация. – 2019. – С. 47. – URL: https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye летательные аппараты_i_protivovozdusnaa_oborona_problemy_i_perspektivy_protivostoaniya (дата обращения: 20.02.2025).
8. Макаренко С.И., Тимошенко А.В. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Ч. 2. Огневое поражение и физический перехват // Системы управления, связи и безопасности. – 2020. – № 1. – С. 147-197. – DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10106.
9. Pasha J. et al., The drone scheduling problem: a systematic state-of-the-art review // IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. – 2022. – P. 24. – DOI: 10.1109/TITS.2022.3155072.
10. Abdelkader M., Güler S., Jaleel H., Shamma J. S. Aerial swarms: recent applications and challenges // Current Robotics Reports. – 2021. – No. 2 (3). – P. 309-320. – DOI: 10.1007/s43154-021-00063-4.

11. Mohsan S.A.H., Khan M.A., Noor F., Ullah I., Alsharif M.H. Towards the unmanned aerial vehicles (UAVs): a comprehensive review // *Drones*. – 2022. – No. 6 (6), 147. – P. 27. – DOI: 10.3390/drones6060147.
12. DARPA-серый кардинал американских технологий. Аналитический обзор // Росконгресс, 06.02.2025. – URL: <https://cdnweb.roscongress.org/upload/medialibrary/ffe/DARPA03.pdf?17388400017118014> (дата обращения: 20.02.2025).
13. Swarms of AI-fueled drones, vehicles track targets in AUKUS tests. – URL: <https://www.yahoo.com/news/swarms-ai-fueled-drones-vehicles-150216013.html> (дата обращения: 20.02.2025).
14. Stephen L. Shield AI unveils V-Bat Teams drone swarm tech, with eye to Replicator // *Defense News*. – URL: <https://www.yahoo.com/news/shield-ai-unveils-v-bat-185742088.html> (дата обращения: 20.02.2025).
15. Бойко А. Perdix. – URL: <https://robotrends.ru/robopedia/perdix> (дата обращения: 20.02.2025).
16. Беспилотные рои готовятся к бою // Военное обозрение от 24.11.2020. – URL: <https://topwar.ru/177344-bespilotnye-roj-gotovjatsja-k-boju.html> (дата обращения: 20.02.2025).
17. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. – СПб.: Научное издание, 2020. – 204 с.
18. Распознавание воздушных объектов типа «птицы» по траекторным признакам. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raspoznavanie-vozdushnyh-obektov-tipa-ptitsy-po-traektornym-priznaka>.
19. Ерёмин Г.В., Гаврилов А.Д., Назарчук И.И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО // *Армейский вестник*. – 2015. – URL: <http://armynews.ru/2015/02/malorazmernye-bespilotniki-novaya-problema-dlya-pvo>.
20. Верба В.С., Гаврилов К.Ю., Ильчук А.Р., Татарский Б.Г., Филатов А.А. Радиолокация для всех / под ред. В.С. Вербы. – М.: Техносфера, 2020. – 504 с.
21. Абросимов В.К., Михайлова Е.С. Методы формирования пространственно-временных скоплений объектов в недружественной среде // *Автоматизация*. – 2023. – Т. 29, № 4. – С. 11-19. – DOI: 10.15372/AUT20230402.
22. Junayed Pasha, Zeinab Elmi, Sumit Purkayastha, Amir M. Fathollahi-Fard, Ying-En Ge, Yui-Yip Lau. The Drone Scheduling Problem: A Systematic State-of-the-Art Review // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2022. – Vol. 23, Issue 9. – P. 14224-14247. – DOI: 10.1109/TITS.2022.3155072.
23. Qi X., Chong J., Zhang Q., Yang Z. Collaborative computation offloading in the multi-UAV fleet mobile edge computing network via connected dominating set // *IEEE Trans. Veh. Technol.* – 2022. – 71 (10). – P. 10832-10848. – <https://doi.org/10.1109/tvt.2022.3188554>.
24. Vaswani A. et al. Attention is all you need // 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017). – 2017. – P. 11.
25. Wu X., Gao Z., Yuan S., Hu Q., Dang Z. A dynamic task allocation algorithm for heterogeneous UAV swarms // *Sensors*. – 2022. – 22 (6), 2122. – P. 18. – DOI: 10.3390/s22062122.
26. Ahmad S., Zhang J., Khan A., Khan U.A., Hayat B. JO-TADP: learning-based cooperative dynamic resource allocation for MEC-UAV-enabled wireless network // *Drones*. – 2023. – 7 (5), 303. – P. 35. – DOI: 10.3390/drones7050303.
27. Bai Y., Zhao H., Zhang X., Chang Z., Jäntti R., Yang K. Toward autonomous multi-UAV wireless network: a survey of reinforcement learning-based approaches // *IEEE Commun. Surv. Tutorials*. – 2023. – 25 (4). – P. 3038-3067. – DOI: 10.1109/COMST.2023.3323344.
28. Zhu R., Huang M., Sun K., Hou Y., Wan Y., He H. Deep Reinforcement Learning Based Task Offloading for UAV-Assisted Edge Computing // *IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*, 2023: IEEE. – P. 1104-1111.
29. Ding Y., Yang Z., Pham Q.V., Hu Y., Zhang Z., Shikh-Bahaei M. Distributed machine learning for UAV swarms: computing, sensing, and semantics // *IEEE Internet Things J.* – 2023. – DOI: 10.1109/JIOT.2023.3341307.
30. Sutton R.S., Barto A.G. Reinforcement Learning: An Introduction. A Bradford Book. – 2018. – 526 p.

REFERENCES

1. Radchenko A. Barrazhiruyushchiye boepripsy i sposoby bor'by s nimi [Loitering munitions and methods of combating them], *Armeyskiy sbornik* [Army collection], 2023, No. 9.
2. Afonin I.E., Makarenko S.I., Petrov S.V., Privalov A.A. Analiz opyta boevogo primeneniya grupp bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya porazheniya zenitno-raketnykh kompleksov sistemy protivovozdushnoy oborony v voennykh konfliktakh v Sirii, v Livii i v Nagornom Karabakhe [Analysis of combat experience as groups of unmanned aerial vehicles are used to defeat anti-aircraft missile means of the air defense system in Syria, Libya and Nagorno-Karabakh wars], *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2020, No. 4, pp. 163-191. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10406.

3. Gorodetskiy V.I. Povedencheskie modeli kiber-fizicheskikh sistem i gruppovoe upravlenie: osnovnye ponyatiya [Behavioral model for cyber-physical system and group control: the basic concepts], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1 (203), pp. 144-162. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-1-144-162.
4. Borovik V.S. [i dr.]. Kollektivy intellektual'nykh robotov. Sfery primeneniya. Seriya: "Intellektual'nye tekhnicheskie sistemy" (podseriya: "Kognitivnaya robototekhnika") [Collectives of intelligent robots. Application areas. Series: "Intelligent technical systems" (subseries: "Cognitive robotics")], red. by V.I. Syryamkina. Tomsk: STT, 2018, 140 p.
5. Huang W., Guo H., Liu J. Task Offloading in UAV Swarm-Based Edge Computing: Grouping and Role Division, in *2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 7–11 Dec. 2021, pp. 1-6. DOI: 10.109/ GLOBE COM46 510. 2021. 96859 20.
6. Zhu A., Lu H., Ma M., Zhou Z., Zeng Z. DELOFF: decentralized learning-based task offloading for multi-UAVs in U2X assisted heterogeneous networks, *Drones*, 2023, 7 (11), 656, pp. 1-31. DOI: 10.3390/drones7110656.
7. Rostopchin V.V. Udarnye bespilotnye letatel'nye apparaty i protivovozdushnaya oborona – problemy i perspektivy protivostoyaniya [Attack unmanned aerial vehicles and air defense – problems and prospects of confrontation], *Bespilotnaya aviatsiya* [Unmanned aviation], 2019, pp. 47. Available at: https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdushnaya_oborona_problemy_i_perspektivy_protivostoyaniya (accessed 20 February 2025).
8. Makarenko S.I., Timoshenko A.V. Analiz sredstv i sposobov protivodeystviya bespilotnym letatel'nym apparatam. Ch. 2. Ognevoe porazhenie i fizicheskiy perekhvat [Analysis of means and methods of counteracting unmanned aerial vehicles. Part 2. Fire damage and physical interception], *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2020, No. 1, pp. 147-197. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10106.
9. Pasha J. et al., The drone scheduling problem: a systematic state-of-the-art review, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 2022, pp. 24. DOI: 10.1109/TITS.2022.3155072.
10. Abdelkader M., Güler S., Jaleel H., Shamma J. S. Aerial swarms: recent applications and challenges, *Current Robotics Reports*, 2021, No. 2 (3), pp. 309-320. DOI: 10.1007/s43154-021-00063-4.
11. Mohsan S.A.H., Khan M.A., Noor F., Ullah I., Alsharif M.H. Towards the unmanned aerial vehicles (UAVs): a comprehensive review, *Drones*, 2022, No. 6 (6), 147, pp. 27. DOI: 10.3390/drones6060147.
12. DARPA-seryy kardinal amerikanskikh tekhnologiy. Analiticheskiy obzor [DARPA - the gray cardinal of American technologies. Analytical review], *Roskongress* [Roscongress], 06.02.2025. Available at: <https://cdnweb.roscongress.org/upload/medialibrary/ffe/DARPA03.pdf?17388400017118014> (accessed 20 February 2025).
13. Swarms of AI-fueled drones, vehicles track targets in AUKUS tests. Available at: <https://www.yahoo.com/news/swarms-ai-fueled-drones-vehicles-150216013.html> (accessed 20 February 2025).
14. Stephen L. Shield AI unveils V-Bat Teams drone swarm tech, with eye to Replicator, *Defense News*. Available at: <https://www.yahoo.com/news/shield-ai-unveils-v-bat-185742088.html> (accessed 20 February 2025).
15. Boyko A. Perdix. Available at: <https://robotrends.ru/robopedia/perdix> (accessed 20 February 2025).
16. Bespilotnye roi gotovyatsya k boyu [Unmanned swarms prepare for battle], *Voennoe obozrenie ot 24.11.2020* [Military Review of 11.24.2020]. Available at: <https://topwar.ru/177344-bespilotnye-roi-gotovjatsja-k-boju.html> (accessed 20 February 2025).
17. Makarenko S.I. Protivodeystvie bespilotnym letatel'nym apparatam: monografiya [Counteraction to unmanned aerial vehicles: monograph]. Saint Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2020, 204 p.
18. Raspoznavanie vozdushnykh ob"ektov tipa «ptitsy» po traektornym priznakam [Recognition of aerial objects of the "bird" type by trajectory features]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/raspoznavanie-vozdushnyh-obektov-tipa-ptitsy-po-traektornym-priznaka>.
19. Eremin G.V., Gavrilov A.D., Nazarchuk I.I. Malorazmernye bespilotniki – novaya problema dlya PVO [Small-sized drones – a new problem for air defense], *Armeyskiy vestnik* [Army Bulletin], 2015. Available at: <http://armynews.ru/2015/02/malorazmernye-bespilotniki-novaya-problema-dlya-pvo>.
20. Verba V.S., Gavrilov K.Yu., Il'chuk A.R., Tatarskiy B.G., Filatov A.A. Radiolokatsiya dlya vsekh [Radar for everyone], ed. by V.S. Verby. Moscow: Tekhnosfera, 2020, 504 p.
21. Abrosimov V.K. Mikhaylova E.S. Metody formirovaniya prostranstvenno- vremennykh skopleniy ob"ektov v nedruzhestvennoy srede [Methods for the formation of spatiotemporal clusters of objects in an unfriendly environment], *Avtometriya* [Autometry], 2023, Vol. 29, No. 4, pp. 11-19. DOI: 10.15372/AUT20230402.

22. Junayed Pasha, Zeinab Elmi, Sumit Purkayastha, Amir M. Fathollahi-Fard, Ying-En Ge, Yui-Yip Lau. The Drone Scheduling Problem: A Systematic State-of-the-Art Review, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, Vol. 23, Issue 9, pp. 14224-14247. DOI: 10.1109/TITS.2022.3155072.
23. Qi X., Chong J., Zhang Q., Yang Z. Collaborative computation offloading in the multi-UAV fledged mobile edge computing network via connected dominating set, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2022, 71 (10), pp. 10832-10848. Available at: <https://doi.org/10.1109/tvt.2022.3188554>.
24. Vaswani A. et al. Attention is all you need, *31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017)*, 2017, pp. 11.
25. Wu X., Gao Z., Yuan S., Hu Q., Dang Z. A dynamic task allocation algorithm for heterogeneous UAV swarms, *Sensors*, 2022, 22 (6), 2122, pp. 18. DOI: 10.3390/s22062122.
26. Ahmad S., Zhang J., Khan A., Khan U.A., Hayat B. JO-TADP: learning-based cooperative dynamic resource allocation for MEC-UAV-enabled wireless network, *Drones*, 2023, 7 (5), 303, pp. 35. DOI: 10.3390/drones7050303.
27. Bai Y., Zhao H., Zhang X., Chang Z., Jäntti R., Yang K. Toward autonomous multi-UAV wireless network: a survey of reinforcement learning-based approaches, *IEEE Commun. Surv. Tutorials.*, 2023, 25 (4), pp. 3038-3067. DOI: 10.1109/COMST.2023.3323344.
28. Zhu R., Huang M., Sun K., Hou Y., Wan Y., He H. Deep Reinforcement Learning Based Task Offloading for UAV-Assisted Edge Computing, *IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*, 2023: IEEE, pp. 1104-1111.
29. Ding Y., Yang Z., Pham Q.V., Hu Y., Zhang Z., Shikh-Bahaei M. Distributed machine learning for UAV swarms: computing, sensing, and semantics, *IEEE Internet Things J.*, 2023. DOI: 10.1109/JIOT.2023.3341307.
30. Sutton R.S., Barto A.G. Reinforcement Learning: An Introduction. A Bradford Book, 2018, 526 p.

Абросимов Вячеслав Константинович – Главный научно-исследовательский испытательный межвидовой центр перспективного вооружения Минобороны России; e-mail: avk787@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89168153512; д.т.н.; член-корреспондент РАН; с.н.с.

Долгов Глеб Александрович – Главный научно-исследовательский испытательный межвидовой центр перспективного вооружения Минобороны России; e-mail: gleb_dolgov@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79133043935; с.н.с.

Михайлова Екатерина Сергеевна – Главный научно-исследовательский испытательный межвидовой центр перспективного вооружения Минобороны России; e-mail: ekaterinaolimp99@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89175192916; м.н.с.

Abrosimov Vyacheslav Konstantinovich – Main Research and Testing Interspecific Center for Advanced Weapons of the Russian Ministry of Defense; e-mail: avk787@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79168153512; dr. of eng. sc.; Corresponding Member of RARAS; senior researcher.

Dolgov Gleb Aleksandrovich – Main Research and Testing Interspecific Center for Advanced Weapons of the Russian Ministry of Defense; e-mail: gleb_dolgov@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79133043935; senior researcher.

Mikhailova Ekaterina Sergeevna – Main Research and Testing Interspecific Center for Advanced Weapons of the Russian Ministry of Defense; e-mail: ekaterinaolimp99@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79175192916; junior researcher.

УДК 004.932:004.89

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-19-30

М.А. Астапова

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ В ЗАДАЧЕ СЕГМЕНТАЦИИ НОР ГРЫЗУНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБОКИХ СВЕРТОЧНЫХ АРХИТЕКТУР

Исследуется применение нейросетевых архитектур для семантической сегментации нор грызунов с целью мониторинга их популяции на сельскохозяйственных полях. В частности, рассматриваются три модели для семантической сегментации: сверточный автокодировщик (CAK), SegNet и U-Net. Эти модели применяются для анализа изображений, полученных с беспилотных

летательных аппаратов (БпЛА) и наземных роботизированных средств (РТС), что позволяет автоматически выявлять норы, минимизируя необходимость в трудозатратах при обработке больших объемов данных. Для обучения и тестирования моделей была подготовлена выборка, включающая 247 RGB-изображений, содержащих 1098 размеченных нор. Оценка показателей качества семантической сегментации проводилась с использованием метрики Джаккара (IoU), в результате чего были получены следующие значения: 0,511 для САК, 0,548 для SegNet и 0,529 для U-Net. Была проведена оценка вычислительных ресурсов, необходимых для внедрения этих моделей в бортовые вычислительные устройства (БВУ) мобильных РТС. Рассмотрены два критерия: количество операций с плавающей точкой (GFLOPS) и количество параметров моделей. Результаты показали, что SegNet требует 2,23 GFLOPS и имеет 0,76 миллиона параметров, что в 2,58 и 2,33 раза меньше по сравнению с САК и U-Net соответственно. Количество операций с плавающей точкой для SegNet также оказалось на 2,43 и 1,88 раза ниже, чем у САК и U-Net соответственно. В результате, SegNet превзошла САК и U-Net как в эффективности сегментации, так и в требуемых вычислительных ресурсах. Данная работа выполнялась в рамках реализации системы компьютерного зрения сельскохозяйственной РТС.

Сельскохозяйственная робототехника; интеллектуальное управление роботами; компьютерное зрение; семантическая сегментация; глубокое обучение.

M.A. Astapova

INTELLIGENT CONTROL OF ROBOTICS AT RODENT BURROW SEGMENTATION USING DEEP CONVOLUTIONAL ARCHITECTURES

In this paper, we investigate the application of neural network architectures for semantic segmentation of rodent burrows for monitoring their population in agricultural fields. In particular, three models for semantic segmentation are considered: convolutional autoencoder (CAE), SegNet, and U-Net. These models are applied to analyze images obtained from unmanned aerial vehicles (UAVs) and ground robotic means, which allows for automatic burrow detection, minimizing the need for labor costs in processing large amounts of data. A sample of 247 RGB images containing 1098 labeled burrows was prepared for training and testing the models. The quality indicators of semantic segmentation were assessed using the Jaccard metric (IoU), which resulted in the following values: 0.511 for CAE, 0.548 for SegNet, and 0.529 for U-Net. An assessment of the computational resources required to implement these models in on-board computing units (OCUs) of mobile robotic means was conducted. Two criteria were considered: the number of floating-point operations (GFLOPS) and the number of model parameters. The results showed that SegNet requires 2.23 GFLOPS and has 0.76 million parameters, which is 2.58 and 2.33 times less than SAE and U-Net, respectively. The number of floating-point operations for SegNet was also 2.43 and 1.88 times lower than that of SAE and U-Net, respectively. As a result, SegNet outperformed SAE and U-Net in both segmentation efficiency and required computational resources. This work was carried out as part of the implementation of a computer vision system for an agricultural robotic means.

Agricultural robotics; intelligent robot control; computer vision; semantic segmentation; deep learning.

Введение. Одним из важнейших этапов контроля численности грызунов является выявление нор на сельскохозяйственных территориях [1, 2]. Традиционно этот процесс осуществляется вручную – работники обходят поля и подсчитывают норы, что требует значительных временных и трудовых затрат. В связи с этим актуальной задачей становится автоматизация данного процесса. Перспективным направлением является использование роботизированных систем, включая беспилотные летательные аппараты (БпЛА) и наземные робототехнические средства, оснащённые системами компьютерного зрения. Эти технологии обеспечивают автономное перемещение по полю, а также сбор и анализ изображений или видеоданных поверхности сельскохозяйственных угодий. Автоматизированная обработка этих данных направлена на локализацию нор, что предполагает точное определение их пространственного расположения.

Задача локализации объектов может быть решена различными методами: через детекцию, которая включает определение координат прямоугольной рамки, охватывающей локализуемые объекты, или с помощью сегментации, заключающейся в формировании маски, повторяющей форму объекта определённого класса на изображении [3]. В отличие от детекции, основным отличием методов сегментации является именно определение

формы объектов. Задача сегментации делится на несколько типов: семантическую [4], объектную [5] и паноптическую [6]. Дополнительные процедуры в объектной и паноптической сегментации увеличивают сложность обработки обучающих выборок и снижают устойчивость процесса обучения. Также эти процедуры значительно повышают вычислительную сложность моделей и замедляют обработку данных, что ограничивает их применение на бортовых вычислительных устройствах сельскохозяйственных роботов. На мобильных робототехнических средствах необходимо выбирать модели семантической сегментации, обладающие минимальной вычислительной сложностью при достижении ими приемлемых результатов сегментации.

На данный момент в открытом доступе отсутствуют выборки изображений сельскохозяйственных полей, на которых расположены норы грызунов, что делает актуальной задачу сбора и разметки таких данных.

В работе предлагается сравнительное исследование глубоких сверточных нейросетевых архитектур, выполняющих семантическую сегментацию: CAK [7–9], SegNet [10], U-Net [11].

Описанное в данной работе исследование выполнялось в рамках реализации системы компьютерного зрения сельскохозяйственного робототехнического средства [12] представленного на рис. 1.



Рис. 1. Сельскохозяйственная робототехническая платформа

Одной из функций мобильного робототехнического средства является автоматическая локализация нор грызунов, которая выполняется для сброса туда отравленного зерна. Система травления состоит из RGB камеры, которая выполняет съемку поверхности поля, на котором располагаются норы грызунов; движущейся каретки, соединенной с трубой, через которую выполняется сбрасывание отравляющих веществ против грызунов; каретка движется по направляющим полозьям; движение осуществляется шаговыми двигателями. Сброс отравляющих веществ выполняется специализированной системой, состоящей из: воздушного компрессора, который через трубку из контейнера выдувает в обнаруженную нору отравляющие вещества. Бортовое вычислительное устройство (БВУ) мобильной платформы получает RGB-кадры поля, которые затем подвергаются семантической сегментации. В результате сегментации определяются координаты найденных нор, в которые система сбрасывает отравляющие вещества.

Обзор существующих подходов. В исследовании [13] изучается обнаружение и классификация кластеров нор полёвки Брандта с использованием спутниковых снимков GF-2 и модели Faster R-CNN. Рассмотрены три подхода: OBIC (объектно-ориентированный анализ), BTC (текстурная классификация) и BVIC (по вегетационному индексу). OBIC показал наилучшие результаты (AP 63,80%, F1 = 0,722), BTC – (AP 55,95%, F1 = 0,666), BVIC – наименьшую точность (AP 29,45%, F1 = 0,437).

В работе [14] представлен алгоритм для обнаружения местоположения нор, созданных грызунами, с использованием аэрофотосъемки с помощью БПЛА. Для классификации изображений использовалась модель опорных векторов (SVM) с радиальной базисной функцией. Точность классификации зависела от ширины ядра SVM: максимальная точность была достигнута при ширине ядра 0,1, с точностью 99,07% на обучающих данных и 96,5% на тестовых данных. Общая точность предложенного метода по обнаружению местоположения нор составила 96,15%.

Авторы работы [15] использовали машинное обучение и аэрофотосъемку с БПЛА для обнаружения нор полёвки в сельском хозяйстве. Модель YOLOv3, обученная на мультимодальных данных, показала высокую точность в обнаружении нор полёвки, достигая средней точности (mAP) 0,86 и F1-оценки около 93,39%.

В исследовании [16] предложена усовершенствованная модель CGT-YOLOv5n для обнаружения нор грызунов в сложных луговых условиях с БПЛА. Она включает: CAM (повышает точность детекции мелких объектов и снижает влияние теней), ODConv (адаптирует модель к разным изображениям), TSCODE (оптимизирует контекст для классификации и регрессии). При IoU = 0,5 средняя точность (mAP_{0,5}) достигает 92,8% (+3,3% к базовой модели), а mAP_{0,5:0,95} — 46,2% (+4,3%).

Авторами [17] была разработана методика автоматического, точного и эффективного обнаружения нор полевок в степных экосистемах. Для этого использовались БПЛА для сбора изображений и методы глубокого обучения для их анализа. Были протестированы шесть моделей глубокого обучения для детекции объектов: Faster R-CNN, R-FCN, Cascade R-CNN, SSD, RetinaNet и YOLOv4. Наилучшие результаты показала модель YOLOv4, достигнувшая точности обнаружения (Precision) 94,3% и полноты (Recall) 93,7%.

В статье [18] представлена усовершенствованная модель детекции объектов BSM-YOLO, основанная на архитектуре YOLOv5, для точного и эффективного обнаружения нор грызунов в степных экосистемах. Модель BSM-YOLO была обучена на наборе данных, содержащем 2397 изображений нор грызунов. Результаты показали, что BSM-YOLO достигла средней точности обнаружения (mAP) в 94,5%, что на 5,4% выше по сравнению с базовой моделью YOLOv5s. Кроме того, скорость детекции увеличилась на 8,7 кадров в секунду.

В работе [19] предложен метод обнаружения нор полевых мышей на пастбищах с использованием глубокого обучения. Разработана CNN-модель для анализа изображений с БПЛА. Обучение проводилось на 5181 изображении, тестирование на 518 изображениях. Faster R-CNN и улучшенный SSD показали схожую точность, однако SSD оказался быстрее в 5 раз. Лучшие метрики: Precision – 98,8% (SSD), Recall – 97,5% (Faster R-CNN), F1-Score – 97,9% (Faster R-CNN).

Большинство современных подходов требуют ручного анализа и ограничены задачами классификации без точной локализации нор. Таким образом, в рамках исследования предполагается проведение сбора и разметки выборки изображений с норами грызунов в контексте задачи сегментации, сравнительного исследования эффективности различных архитектур глубоких нейронных сетей, предназначенных для выполнения семантической сегментации изображений.

Материалы и методы. В рамках работы была собрана и размечена выборка изображений нор различных грызунов. Изображения были получены из открытых источников в сети Интернет посредством поисковых запросов в системе Google Image [20] «rodent burrows», «rodent holes», «mice burrows», «mice holes», «hamster burrows», «hamster holes» и т.д. В результате была составлена выборка из 247 изображений. При этом, на каждом изображении находится хотя бы одна нора. Каждое из 247 изображений было размечено вручную в соответствии с задачей семантической сегментации. Разметка выполнялась посредством программного средства [21]. В табл. 1 содержится наиболее значимые параметры размеченной выборки изображений.

Таблица 1

Параметры выборки

Параметр выборки	Значение параметра
Общее количество изображений	247
Общее количество нор на изображениях	1098
Среднее количество нор на одном изображении	4,4
Общее количество пикселей	3×10^9
Количество пикселей, принадлежащих классу «норы»	$7,2 \times 10^6$
Количество пикселей, принадлежащих классу «фон»	$2,95 \times 10^9$

Примеры изображений из собранной и размеченной выборки приведены на рис. 2.

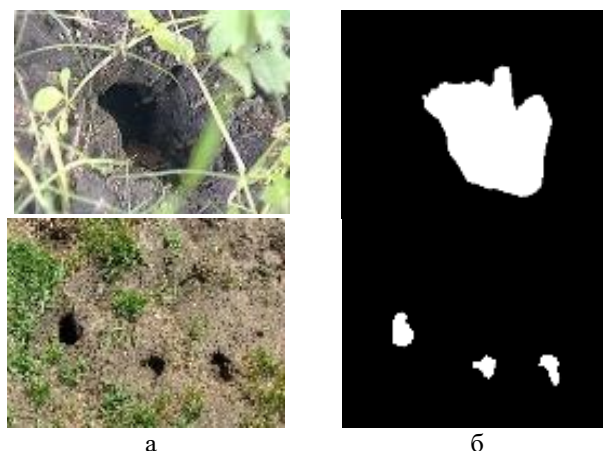


Рис. 2. (а) Изображения и (б) Размеченные сегментационные карты выборки данных

Описание используемых нейронных сетей. В работе было выполнено сравнительное исследование трех распространенных нейросетевых архитектур: САК, U-Net, SegNet.

САК. Архитектура нейронной сети САК приведена на рис. 3.

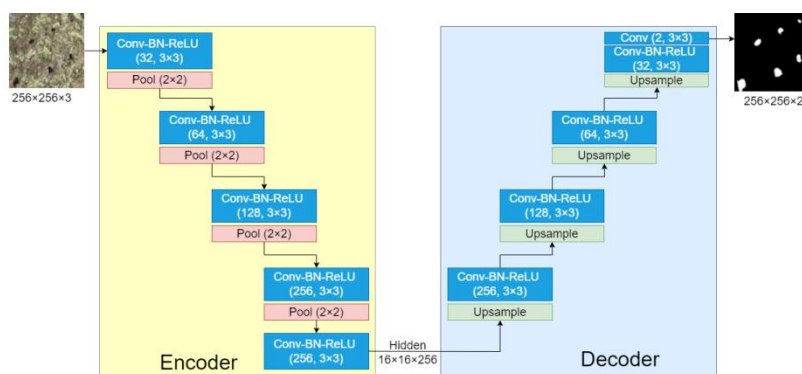


Рис. 3. Архитектура САК

Нейронная сеть данной архитектуры состоит из двух симметричных частей – энкодера и декодера (блоки Encoder и Decoder на рис. 3). Энкодер выполняет обработку поступающего на его вход RGB изображения размером 256×256 пикселей и выделяет в нем наиболее значимую информацию. Энкодер состоит из блоков обработки информации, куда последовательно включены слои свертки, пакетной нормализации (Batch Normalization – BN) [22], активации ReLU [23]. На рис. 3 это изображено как единый блок Conv-BN-ReLU, при этом, в скобках для каждого блока указано количество ядер свертки и размер каждого ядра свертки (например, 16, 3×3). Блоки Conv-BN-ReLU перемежаются блоками субдискретизации – отбора значимой информации и снижения размерности (Pool). В данной операции исходная карта признаков разбивается на равные участки размером 2×2 , и на каждом таком участке производится отбор максимального значения. По мере углубления обработки информации в автокодировщике, количество карт признаков увеличивается при снижении размера самих карт признаков, в результате чего формируется промежуточное представление, которое на рис. 3 обозначено как Hidden. Декодер выполняет обратную операцию: обрабатывая промежуточное представление, декодер выполняет построение результирующей сегментационной маски, поэтапно повышая размер промежуточных карт признаков и уменьшая их количество. Само увеличение размера карт признаков осуществляется посредством операции билинейной интерпо-

ляции карт признаков (блок Upsample на рис. 3). Обработка карт признаков, полученных в результате операции Upsample, также выполняется блоками Conv-BN-ReLU, описанных выше. На выходе архитектуры формируется множество результирующих карт признаков, количество которых равняется количеству классов сегментации, а размер выходных карт равен размеру входного изображения. При этом, каждая карта выходных признаков содержит в себе сегментационные маски одного класса. На выходе нейронной сети применяется активационная функция softmax:

$$\text{softmax}(z_i) = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^N e^{z_j}},$$

где z_i – это значение i -го нейрона выходного слоя до применения активационной функции, N – количество классов.

SegNet. Особенности архитектуры SegNet отражены на рис. 4.

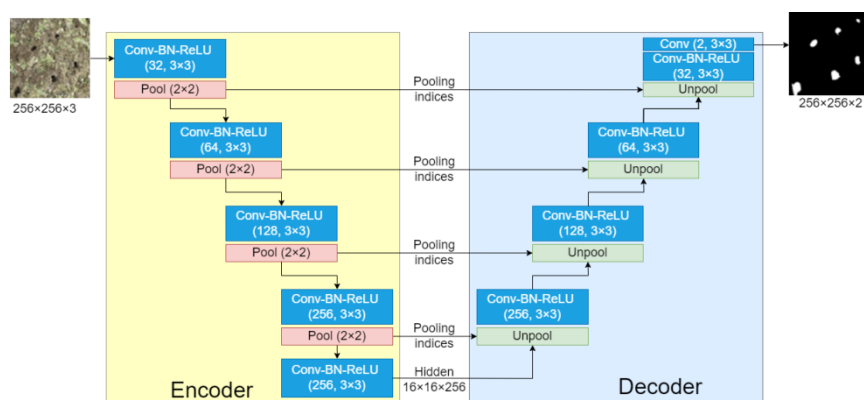


Рис. 4. Архитектура SegNet

SegNet также является глубокой сверточной архитектурой, также реализующей принципы автокодировщика. Отличительной особенностью этой нейронной сети является применение специализированных средств для повышения размерностей карт признаков в декодере: на этапе обработки информации кодировщиком при снижении размерностей карт признаков посредством операции субдискретизации (блок Pool на рис. 4) для каждого отобранного максимального элемента сохраняется также и его индекс. Эти индексы учитываются уже в декодере на этапе повышения размерности карт признаков (блок Unpool на рис. 4) следующим образом: в новую карту признаков большей размерности копируются элементы из карт признаков, полученных на предыдущем слое. Самое важное, что копирование выполняется в элементы, индексы которых совпадают с индексами максимальных элементов на соответствующем этапе субдискретизации в энкодере. Данная операция имеет два существенных преимущества: во-первых, в декодере выполняется учет информации, получаемой в энкодере, а во-вторых, операция повышения размерности представляет собой простое копирование и не требует дополнительных математических вычислений. Остальные элементы данной нейронной сети полностью воспроизводят САК.

U-Net. Архитектура U-Net приведена на рис. 5.

Нейронная сеть архитектуры U-Net также реализует принципы обработки информации автокодировщиком. В этой нейронной сети, также как и в SegNet в декодере происходит учет информации, получаемой в энкодере. Однако, реализовано это при помощи другой операции: выполняется конкатенация (блок Concatenate на рисунке 6 увеличиваемой карты признаков с картой признаков того же размера, получаемой из симметричного слоя энкодера. Сформированная таким образом карта признаков обрабатывается далее следующим сверточным слоем. Повышение размерности карт признаков, также как и в САК, выполняется посредством операции билинейной интерполяции (блок Upsample на рис. 5). Остальные элементы данной нейронной сети полностью воспроизводят САК.

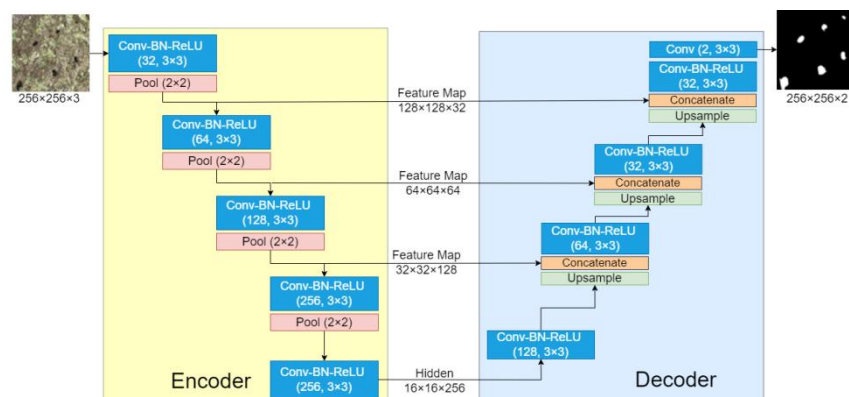


Рис. 5. Архитектура U-Net

Все приведенные нейронные сети реализуют архитектуру автокодировщика. Другой общей особенностью всех приведенных архитектур является одинаковое устройство сверточных слоев и в энкодере, и в декодере. Различаются эти слои только лишь в особенностях передачи информации между энкодером и декодером.

Оценка вычислительной сложности рассматриваемых моделей. В современной робототехнике в качестве БВУ используются малоомощные с вычислительной точки зрения ЭВМ, обладающие низким уровнем энергопотребления. Таким образом, для реализации глубоких нейронных сетей необходима также оценка требований к вычислительным ресурсам, необходимым для их функционирования.

Для определения вычислительных требований к рассматриваемым нейросетевым моделям была выполнена оценка необходимого для каждой модели количества операций с плавающей точкой (floating point operations – FLOPS), количества параметров моделей и размера необходимой для их хранения памяти. В случае малоомощных БВУ наиболее предпочтительными являются те, которые требуют меньшее количество операций с плавающей точкой и обладают меньшим количеством параметров. Результаты сведены в табл. 2.

Таблица 2

Вычислительная сложность и требования к памяти для рассматриваемых нейронных сетей

Модель	Количество операций с плавающей точкой, GFLOPs	Количество параметров	Размер, МБ
CAK	5,42	1 958 882	7,84
SegNet	2,23	760 130	2,93
U-Net	4,21	1 773 890	7,1

Из таблицы видно, что наиболее оптимальным с вычислительной точки зрения является применение архитектуры SegNet, которая имеет в 2,58 раз меньше параметров по сравнению с CAK и в 2,33 раза меньше параметров по сравнению с U-Net. Также SegNet требует в 2,43 раза меньше операций с плавающей точкой по сравнению с CAK и в 1,88 раз меньше операций с плавающей точкой по сравнению с U-Net.

Описание экспериментов. Каждая из описанных в предыдущем разделе нейронных сетей была обучена на выборке данных, описанной в разделе «Описание набора данных». Обучение выполнялось следующим образом: сначала общая выборка была разделена на обучающую и тестовую части: 50% попало в обучающую часть, 50% тестовую. Такое разбиение объясняется, прежде всего, ограниченным размером выборки, что обуславливает необходимость увеличения объема тестовой выборки для повышения надежности результатов метрик. Разбиение выполнялось посредством генератора случайных чисел из равномерного распределения, взятого из библиотеки random языка программирования python. Параметр зерна генератора был взят равным нулю (seed = 0). Обучение выполнялось при помощи библиотеки глубокого обучения pytorch [24]. Каждая модель

обучалась 2000 эпох при помощи модифицированного алгоритма стохастического пакетного (mini-batch) градиентного спуска Adam [25] со стандартными параметрами из библиотеки pytorch. Для предотвращения переобучения были применены следующие методы аугментации изображений обучающей выборки: случайное зеркальное отображение изображений по горизонтали и по вертикали, поворот изображений на случайный угол, взятый из равномерного распределения с диапазоном значений $[-15, 15]$ угловых градусов. В качестве функции потерь была взята функция перекрестной энтропии:

$$E(\hat{y}, y) = -y \log \hat{y} - (1 - y) \log (1 - \hat{y}),$$

где y – это значение истинной метки класса $\hat{y}$ – значение метки класса, сгенерированное нейронной сетью.

Для общей оценки эффективности семантической сегментации используется индекс Джаккара. Данный индекс вычисляется как отношение пересечения истинной площади маски объекта и площади маски объекта, сгенерированной нейронной сетью, к площади их объединения (Intersection Over Union – IoU):

$$IoU = \frac{|S_p \cap S_t|}{|S_p \cup S_t|} = \frac{TP}{TP + FP + FN},$$

где S_p – площадь маски, сгенерированной нейронной сетью, S_t – это площадь истинной маски объекта, TP (True Positive) – это количество истинноположительно распознанных пикселей, FP (False Positive) – это количество ложноположительно распознанных пикселей, FN (False Negative) – это количество ложноотрицательно распознанных пикселей. Данная метрика вычисляется для каждого из классов, представленных в выборке. Для того, чтобы оценить общую эффективность семантической сегментации, используется среднее значение метрики Джаккара:

$$mIoU = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N IoU_i,$$

где N – это количество классов, IoU_i – значение метрики Джаккара, вычисленная для i -го класса.

Результаты и обсуждение. Результаты описанных моделей сведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты сегментации IoU на тестовом наборе

Модель	$mIoU$	IoU для отдельных классов	
		Фон	Норы
CAK	0,746	0,983	0,511
SegNet	0,766	0,983	0,548
U-Net	0,756	0,983	0,529

Архитектура SegNet показала лучшие результаты по производительности на описанной выборке данных. Кроме того, как показано в табл. 2, данная нейронная сеть также имеет меньшее количество параметров (в 2,58 и в 2,33 раз меньше по сравнению с CAK и U-Net соответственно), а также меньшее количество необходимых операций с плавающей точкой по сравнению с другими рассматриваемыми нейронными сетями (в 2,43 и в 1,88 раз меньше по сравнению с CAK и U-Net соответственно). Лучшие результаты, полученные с использованием наиболее простой модели (с точки зрения количества параметров и требуемого количества операций с плавающей точкой), могут быть объяснены следующим образом: в данном случае нейронная сеть обучалась и тестировалась на выборке данных невысокой сложности. Это обусловлено тем, что выборка содержала всего два класса объектов, сами объекты (норы грызунов) имеют гомогенный характер. В таких условиях использование сложных моделей оказывается избыточным, что подтверждено результатами экспериментальных испытаний [26]. Продемонстрированные SegNet результаты показывают наибольшую перспективность данной нейронной сети для реализации на БВУ мобильных роботов не только с точки зрения эффективности сегментации нор грызунов, но и с точки зрения требований к вычислительным возможностям БВУ.

Другим важным выводом из результатов является то, что при сегментации нор грызунов наилучшие показатели демонстрируют модели, в декодерах которых используются механизмы учета карт признаков, сформированных на промежуточных слоях энкодера. Это подтверждается более высокими значениями IoU, достигаемыми нейросетевыми архитектурами SegNet и U-Net, каждая из которых реализует этот механизм по-своему (рис. 3–5). Примеры сегментационных масок представлены на рис. 6.

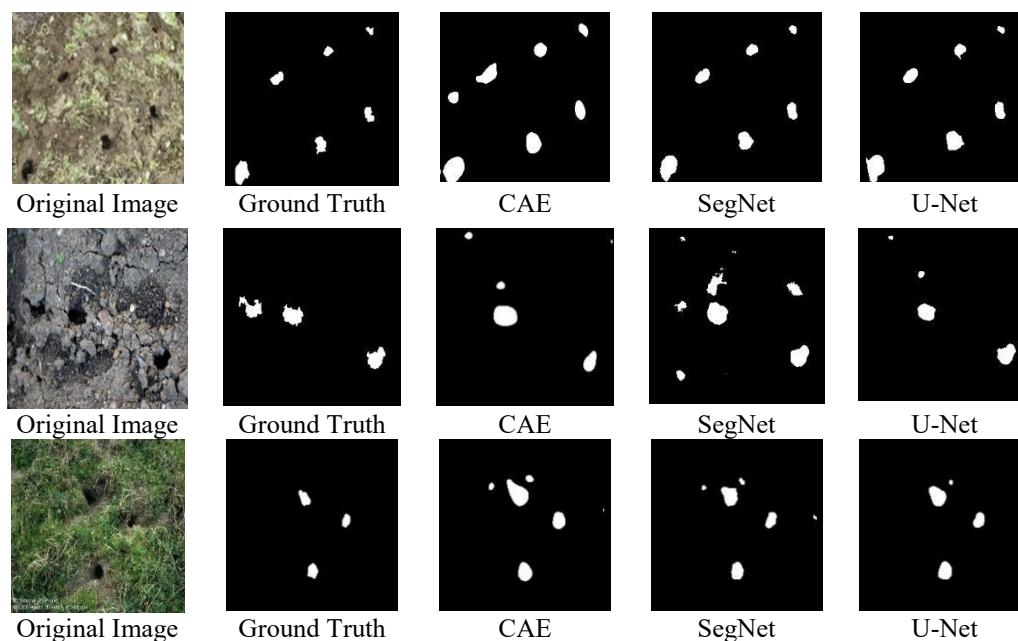


Рис. 6. Визуализация сегментационных масок нор грызунов

Заключение. В рамках данной работы в задаче локализации нор грызунов на изображениях сельскохозяйственных полей были применены нейросетевые архитектуры семантической сегментации (CAE, SegNet, U-Net), которые были обучены протестированы на новой выборке изображений, собранной в рамках этой работы. Также, в целях оценки реализуемости указанных архитектур на БВУ мобильных роботов была выполнена оценка необходимых для каждой архитектуры вычислительных ресурсов. В результате архитектура SegNet показала лучшие результаты как с точки зрения эффективности выполнения семантической сегментации ($mIoU=0,766$, значение IoU для мышинных нор равняется 0,548), так и с точки зрения необходимых вычислительных ресурсов (SegNet имеет в 2,58 и в 2,33 раз меньше параметров по сравнению с CAE и U-Net соответственно, а также требует в 2,43 и в 1,88 раз меньше операций с плавающей точкой по сравнению с CAE и U-Net соответственно). Такие результаты объясняются, в первую очередь, особенностями обучающей выборки: всего два класса разметки, единообразие или относительная гомогенность данных в выборке. Полученные результаты позволяют выбрать SegNet в качестве архитектуры, использующейся в системе компьютерного зрения сельскохозяйственной робототехнической платформы. В дальнейшем планируется выполнить исследование работоспособности SegNet непосредственно на мобильной сельскохозяйственной робототехнической платформе в ходе автономного сбора данных с реальных сельскохозяйственных полей. Также планируется исследовать семантическую сегментацию в смежной задаче локализации нор грызунов на аэрофотоснимках сельскохозяйственных полей, полученных посредством БПЛА.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы № FFZF-2025-0012.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Witmer G. Rodents in Agriculture: A Broad Perspective // *Agronomy*. – 2022. – Vol. 12, No. 6. – P. 1458.
2. Old J. M., Lin S.H., Franklin M.J.M. Mapping out bare-nosed wombat (*Vombatus ursinus*) burrows with the use of a drone // *BMC Ecology*. – 2019. – Vol. 19, No. 1. – P. 1-10.
3. Фаворская М.Н., Нишчхал Н. Верификация разливов нефти на водных поверхностях по аэрофотоснимкам на основе методов глубокого обучения // *Информатика и автоматизация*. – 2022. – Т. 21, № 5. – С. 937-962.
4. Hao S., Zhou Y., Guo Y. A brief survey on semantic segmentation with deep learning // *Neurocomputing*. – 2020. – Vol. 406. – P. 302-321.
5. Hafiz A. M., Bhat G. M. A survey on instance segmentation: state of the art // *International Journal of Multimedia Information Retrieval*. – 2020. – Vol. 9, No. 3. – P. 171-189.
6. Kirillov A., He, K., Girshick R., Rother C., Dollár P. Panoptic segmentation // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – 2019. – P. 9404-9413.
7. Geddes A.M.W. The relative importance of pre-harvest crop pests in Indonesia // *Bulletin-Natural Resources Institute*. – 1992. – No. 47.
8. Leirs H. Management of rodents in crops: the Pied Piper and his orchestra // *ACIAR Monograph Series*. – 2003. – Vol. 96. – P. 183-190.
9. Singleton G., Belmain S., Brown P. R., Aplin K., Htwe N. M. Impacts of rodent outbreaks on food security in Asia // *Wildlife Research*. – 2010. – Vol. 37, No. 5. – P. 355-359.
10. John A. Rodent outbreaks and rice pre-harvest losses in Southeast Asia // *Food Security*. – 2014. – Vol. 6, No. 2. – P. 249-260.
11. Chow J., Su Z., Wu J., Tan P. S., Mao X., Wang Y. H. Anomaly detection of defects on concrete structures with the convolutional autoencoder // *Advanced Engineering Informatics*. – 2020. – Vol. 45. – P. 101105.
12. Krestovnikov K.D., Erashov A.A. Development of architecture and generalized structure of modules for a distributed control system for general-purpose robotic complexes // *Robotics and Cybernetics*. – 2022. – Vol. 10, No. 3. – P. 201-212. (In Russ.).
13. Sun C., Bao Y., Bao Y., Vandansambuu B., Bayarsaikhan S., Gantumur B., Wu K. Detection and classification of Brandt's vole burrow clusters utilizing GF-2 satellite imagery and faster R-CNN model // *Frontiers in Ecology and Evolution*. – 2024. – Vol. 12. – P. 1310046.
14. Heydari M., Mohamad zamani D., Parashkouhi M. G., Ebrahimi E., Soheili A. An Algorithm for Detecting the Location of Rodent-Made Holes through Aerial Filming by Drones // *Archives of Pharmacy Practice*. – 2020. – Vol. 1. – P. 55.
15. Ezzy H., Charter M., Bonfante A., Brook A. How the small object detection via machine learning and UAS-based remote-sensing imagery can support the achievement of SDG2: A case study of vole burrows // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13. – No. 16. – P. 3191.
16. Li C., Luo X., Pan X. CGT-YOLOv5n: A Precision Model for Detecting Mouse Holes Amid Complex Grassland Terrains // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 14, No. 1. – P. 291.
17. Du M., Wang D., Liu S., Lv C., Zhu Y. Rodent hole detection in a typical steppe ecosystem using UAS and deep learning // *Frontiers in Plant Science*. – 2022. – Vol. 13. – P. 992789.
18. Xie T., Luo X., Pan X. BSM-YOLO: A Dynamic Sparse Attention-Based Approach for Mousehole Detection // *IEEE Access*. – 2024.
19. Wan J., Jian D., Yu D. Research on the method of grass mouse hole target detection based on deep learning // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1952. – No. 2. – P. 022061.
20. Google Pictures. – URL: <https://www.google.ru/imghp?hl=ru&ogbl> (дата обращения: 11.01.2025).
21. Labelme. Image Polygonal Annotation with Python. – URL: <https://github.com/wkentaro/labelme> (дата обращения: 11.01.2025).
22. Ioffe S., Szegedy C. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift // *International Conference on Machine Learning*. – PMLR, 2015. – P. 448-456.
23. Glorot X., Bordes A., Bengio Y. Deep sparse rectifier neural networks // *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*. – JMLR Workshop and Conference Proceedings, 2011. – P. 315-323.
24. PyTorch. – URL: pytorch.org (дата обращения: 11.01.2025).
25. Bergmann P., Löwe S., Fauser M., Sattlegger D., Steger C. Improving unsupervised defect segmentation by applying structural similarity to autoencoders // *arXiv preprint arXiv:1807.02011*. – 2018.
26. Астапова М.А., Уздяев М.Ю., Кондратьев В.М. Прогнозирование урожайности зеленых культур на основе мониторинга морфометрических параметров посредством машинного зрения и нейронных сетей // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 11-20.

REFERENCES

1. Witmer G. Rodents in Agriculture: A Broad Perspective, *Agronomy*, 2022, Vol. 12, No. 6, pp. 1458.
2. Old J.M., Lin S.H., Franklin M.J. M. Mapping out bare-nosed wombat (*Vombatus ursinus*) burrows with the use of a drone, *BMC Ecology*, 2019, Vol. 19, No. 1, pp. 1-10.
3. Favorskaya M.N., Nishchkal N. Verifikatsiya razlivov nefi na vodnykh poverkhnostyakh po aerofotosnimkam na osnove metodov glubokogo obucheniya [Verification of oil spills on water surfaces based on deep learning methods using aerial photographs], *Informatika i Avtomatizatsiya* [Informatics and Automation], 2022, Vol. 21, No. 5, pp. 937-962.
4. Hao S., Zhou Y., Guo Y. A brief survey on semantic segmentation with deep learning, *Neurocomputing*, 2020, Vol. 406, pp. 302-321.
5. Hafiz A.M., Bhat G.M. A survey on instance segmentation: state of the art, *International Journal of Multimedia Information Retrieval*, 2020, Vol. 9, No. 3, pp. 171-189.
6. Kirillov A., He, K., Girshick R., Rother C., Dollár P. Panoptic segmentation, *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019, pp. 9404-9413.
7. Geddes A. M. W. The relative importance of pre-harvest crop pests in Indonesia. *Bulletin-Natural Resources Institute*, 1992, No. 47.
8. Leirs H. Management of rodents in crops: the Pied Piper and his orchestra. *ACIAR Monograph Series*, 2003, Vol. 96, pp. 183-190.
9. Singleton G., Belmain S., Brown P.R., Aplin K., Htwe N.M. Impacts of rodent outbreaks on food security in Asia. *Wildlife Research*, 2010, Vol. 37, No. 5, pp. 355-359.
10. John A. Rodent outbreaks and rice pre-harvest losses in Southeast Asia, *Food Security*, 2014, Vol. 6, No. 2, pp. 249-260.
11. Chow J., Su Z., Wu J., Tan P.S., Mao X., Wang Y.H. Anomaly detection of defects on concrete structures with the convolutional autoencoder, *Advanced Engineering Informatics*, 2020, Vol. 45, pp. 101105.
12. Krestovnikov K.D., Erashov A.A. Development of architecture and generalized structure of modules for a distributed control system for general-purpose robotic complexes, *Robotics and Cybernetics*, 2022, Vol. 10, No. 3, pp. 201-212. (In Russ.).
13. Sun C., Bao Y., Bao Y., Vandansambuu B., Bayarsaikhan S., Gantumur B., Wu K. Detection and classification of Brandt's vole burrow clusters utilizing GF-2 satellite imagery and faster R-CNN model, *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2024, Vol. 12, pp. 1310046.
14. Heydari M., Mohamadzamani D., Parashkouhi M. G., Ebrahimi E., Soheili A. An Algorithm for Detecting the Location of Rodent-Made Holes through Aerial Filming by Drones, *Archives of Pharmacy Practice*, 2020, Vol. 1, pp. 55.
15. Ezy H., Charter M., Bonfante A., Brook A. How the small object detection via machine learning and UAS-based remote-sensing imagery can support the achievement of SDG2: A case study of vole burrows, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 16, pp. 3191.
16. Li C., Luo X., Pan X. CGT-YOLOv5n: A Precision Model for Detecting Mouse Holes Amid Complex Grassland Terrains, *Applied Sciences*, 2023, Vol. 14, No. 1, pp. 291.
17. Du M., Wang D., Liu S., Lv C., Zhu Y. Rodent hole detection in a typical steppe ecosystem using UAS and deep learning, *Frontiers in Plant Science*, 2022, Vol. 13, pp. 992789.
18. Xie T., Luo X., Pan X. BSM-YOLO: A Dynamic Sparse Attention-Based Approach for Mousehole Detection, *IEEE Access*, 2024.
19. Wan J., Jian D., Yu D. Research on the method of grass mouse hole target detection based on deep learning, *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2021, Vol. 1952, No. 2, pp. 022061.
20. Google Pictures. Available at: <https://www.google.ru/imghp?hl=ru&ogbl> (accessed: 11 January 2025).
21. Labelme. Image Polygonal Annotation with Python. Available at: <https://github.com/wkentaro/labelme> (accessed: 11 January 2025).
22. Ioffe S., Szegedy C. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift, *International Conference on Machine Learning*, PMLR, 2015, pp. 448-456.
23. Glorot X., Bordes A., Bengio Y. Deep sparse rectifier neural networks, *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*, JMLR Workshop and Conference Proceedings, 2011, pp. 315-323.
24. PyTorch. Available at: pytorch.org (accessed: 11 January 2025).
25. Bergmann P., Löwe S., Fauser M., Sattlegger D., Steger C. Improving unsupervised defect segmentation by applying structural similarity to autoencoders, *arXiv preprint arXiv:1807.02011*, 2018.
26. Astapova M.A., Uzdyayev M.Yu., Kondrat'ev V.M. Prognozirovaniye urozhaynosti zelenykh kul'tur na osnove monitoringa morfometricheskikh parametrov posredstvom mashinnogo zreniya i neyronnykh setey [Prediction the yield of green crops based on monitoring morphometric parameters using machine vision and neural networks], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS], 2024, Vol. 26, No. 3, pp. 11-20.

Астапова Марина Алексеевна – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; e-mail: astapova.m@iiias.spb.su; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79675329363; младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем.

Astapova Marina Alekseevna – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: astapova.m@iiias.spb.su; St. Petersburg, Russia; phone: +79675329363; junior researcher, Laboratory of autonomous robotic systems.

УДК 621.385.21

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-30-40

И.Л. Житяев, М.С. Картель, Ю.Ю. Житяева, А.А. Авакян, В.А. Смирнов

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕМРИСТИВНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР
С ПРОФИЛИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОДОМ ДЛЯ НЕЙРОМОРФНОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ**

Представлены результаты разработки наноразмерных мемристорных структур, применение которых является перспективным для аппаратной реализации систем искусственного интеллекта. Предложена конструкция мемристорной ячейки на основе пленки оксида титана толщиной от 3 до 50 нм, верхний электрод которой представлял профилированную структуру в виде двух высокоаспектных острийных наноразмерных структур (ВОНС), у которой одно из острий было с радиусом 10 нм, а радиус острия второй варьировался в диапазоне от 10 до 50 нм. В качестве материала для верхнего электрода была выбрана платина из-за ее уникальных физико-химических свойств, в том числе высокой химической инертности в широком диапазоне температур и агрессивных сред, низкого удельного электрического сопротивления и устойчивости к окислению. Эти характеристики делают платину оптимальным материалом для использования в электронных устройствах и сенсорных системах, где требуется долговременная стабильность и минимальные потери энергии при передаче сигнала. Представлены результаты моделирования распределения напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке мемристорной ячейки. Моделирование проводилось с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics, в которой решаются системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов, при разности потенциалов между электродами 5 В. На основе результатов моделирования получены и проанализированы зависимости величины напряженности электрического поля от геометрических параметров мемристорной ячейки. Выявлено локальное усиление напряженности электрического поля по периметру интерфейса оксида с ВОНС. Усиление неоднородности напряженности электрического поля возрастает с увеличением толщины оксидной пленки и может достигать 13,4%. Полученные результаты могут быть использованы при разработке нейроморфной электронной компонентной базы робототехнических систем и систем искусственного интеллекта на основе мемристоров.

Мемристор; нейроэлектроника; нейроморфные системы; резистивное переключение; наноразмерные оксидные пленки; напряженность электрического поля.

I.L. Jityaev, M.S. Kartel, Yu.Yu. Jityaeva, A.A. Avakyan, V.A. Smirnov

**INVESTIGATION OF MEMRISTIVE NANOSCALE STRUCTURES WITH
PROFILED INTERFACE FOR NEUROMORPHIC ELECTRONICS**

The article presents the results of the development of nanoscale memristive structures, the application of which is promising for the hardware implementation of artificial intelligence systems. A design of a memristive cell based on a titanium oxide film with a thickness ranging from 3 to 50 nm is proposed. The upper electrode of the cell features a profiled structure in the form of two high-aspect-ratio nanoscale tip structures (HANTS), where one tip has a radius of 10 nm, and the radius of the second tip varies in the range of 10 to 50 nm. Platinum was chosen as the material for the upper electrode due to its unique physicochemical properties, including high chemical inertness across a wide range of temperatures and aggressive environments, low electrical resistivity, and resistance to oxidation. These characteristics make platinum an optimal material for use in electronic devices and sensor systems where long-term stability and minimal energy losses during signal transmission are required. The results of modeling the electric field strength distribution in the interelectrode gap of the memristive cell are presented. The modeling was

performed using COMSOL Multiphysics software, which solves systems of nonlinear partial differential equations using the finite element method, with a potential difference of 5 V between the electrodes. Based on the modeling results, the dependencies of the electric field strength on the geometric parameters of the memristive cell were obtained and analyzed. Local enhancement of the electric field strength was identified along the perimeter of the oxide-HANTS interface. The increase in the non-uniformity of the electric field strength grows with the thickness of the oxide film and can reach 13.4%. The obtained results can be used in the development of neuromorphic electronic components for robotic systems and artificial intelligence systems based on memristors.

Memristor; neuroelectronics; neuromorphic systems; resistive switching; nanoscale oxide films; electric field strength.

Введение. Человечество достигло значительного прогресса в разработке и совершенствовании технологий искусственного интеллекта (ИИ), что привело к их активному внедрению во многие сферы человеческой деятельности, включая медицину, промышленное производство, транспортные системы, образовательные процессы и другие сферы [1–3]. Однако в последние годы темпы прогресса в развитии ИИ снижаются, что обусловлено принципиальными ограничениями, вызванными аппаратными возможностями современных вычислительных систем. Ключевой проблемой является архитектура компьютеров, основанная на принципах, предложенных Джоном фон Нейманом в середине XX века. Архитектура фон Неймана предполагает разделение вычислительной системы на два основных компонента: блок памяти и вычислительный блок, которые физически и функционально изолированы. Такая организация приводит к возникновению так называемого «бутылочного горлышка фон Неймана», которое проявляется в виде задержек при передаче данных между памятью и процессором. Хотя увеличение объема оперативной памяти и повышение производительности процессоров может частично компенсировать эти задержки, такие меры сопровождаются экспоненциальным ростом энергопотребления, что делает их экономически и экологически невыгодными в долгосрочной перспективе.

Для преодоления этих ограничений и обеспечения дальнейшего прогресса в области искусственного интеллекта необходим переход к принципиально новым архитектурным решениям, которые позволят исключить зависимость от традиционной модели фон Неймана [4]. Одним из наиболее перспективных направлений является разработка нейроморфных вычислений на основе использования мемристоров [5, 6]. Мемристор – это биполярный элемент, способный изменять свое сопротивление под воздействием внешнего электрического поля, сохраняя свое состояние даже после отключения питания [7, 8]. Это свойство, известное как резистивная пластичность, делает мемристоры перспективными кандидатами для создания энергоэффективных запоминающих устройств и вычислительных систем следующего поколения.

Помимо применения в качестве энергоэффективных запоминающих устройств, мемристоры активно используются в нейроморфных технологиях, направленных на создание вычислительных систем, имитирующих работу биологических нейронных сетей [9–11]. Это связано с тем, что резистивное переключение мемристоров демонстрирует сходство с поведением синапсов – связей между нейронами в мозге. Благодаря этому свойству мемристоры могут быть использованы для создания искусственных синапсов, что открывает перспективы для разработки нейроморфных чипов, способных к обучению и адаптации, подобно биологическим системам.

Нейроморфные системы, построенные на мемристорах, имитируют принципы работы биологических нейронных сетей, что позволяет существенно повысить эффективность обработки данных и снизить энергопотребление. Такие системы способны выполнять сложные вычисления параллельно, что особенно важно для задач, связанных с машинным обучением и обработкой больших объемов информации.

Мемристоры обладают потенциалом для создания компактных и высокопроизводительных устройств. Это открывает новые горизонты для развития технологий ИИ и робототехники, где они могут быть интегрированы в системы, имитирующие работу органов чувств человека. Например, мемристорные технологии позволяют создавать устройства,

воспроизводящие функции тактильных рецепторов, терморецепторов и ноцицепторов (болевых рецепторов) [12, 13]. Это дает возможность роботам "чувствовать" механические воздействия, изменения температуры и даже болевые стимулы, что способствует повышению их автономности и безопасности в различных условиях эксплуатации.

Конструкция и моделирование. Мемристор представляет собой многослойную структуру, состоящую из трех основных компонентов: верхнего и нижнего электродов, между которыми расположен активный слой. Материалы, используемые в активном слое (например, оксиды металлов), играют ключевую роль в определении функциональных характеристик устройства, включая его способность переключаться между состояниями с высоким и низким сопротивлением [14–16]. Это переключение осуществляется за счет изменения проводимости активного слоя под воздействием приложенного электрического напряжения, что позволяет мемристорам выполнять функции как хранения, так и обработки информации в единой физической структуре. Такая интеграция устраняет необходимость разделения блоков памяти и вычислений, что является одним из ключевых преимуществ мемристоров перед традиционными архитектурами фон Неймана.

Моделирование мемристорных структур является важным инструментом для изучения их физических свойств, оптимизации параметров и проектирования устройств на их основе [17–19]. Оно включает анализ процессов, происходящих в активном слое, таких как миграция ионов, образование и разрушение наноразмерных каналов проводимости, а также изменение электронной структуры материалов [20, 21]. Моделирование позволяет исследовать влияние различных материалов активного слоя и геометрии электродов на ключевые характеристики мемристоров, включая скорость переключения, энергопотребление и долговечность, а также определять оптимальные параметры для их создания.

В данной работе рассматривается модель мемристорной структуры, состоящей из слоя диоксида титана (TiO_2), сформированного на титановой подложке с профилированным платиновым верхним электродом в виде высокоаспектной осрильной наноразмерной структуры (ВОНС) (рис. 1). Одной из ключевых задач мемристоров является воспроизведение синаптических функций, что обеспечивается резистивным переключением, характерным для TiO_2 . Диоксид титана зарекомендовал себя, как перспективный материал для реализации таких функций благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам. Резистивное переключение в TiO_2 связано с изменением его проводимости под воздействием внешнего электрического поля, что обусловлено сложными процессами, происходящими в активном слое материала [22–24].

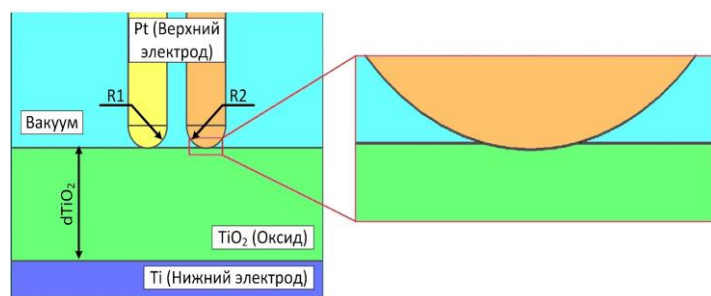


Рис. 1. Общий вид модели мемристорной ячейки с увеличенной областью зоны контакта профилированного верхнего контакта с оксидным слоем

Одним из основных механизмов резистивного переключения в TiO_2 является образование и разрушение наноразмерных каналов проводимости, состоящих из кислородных вакансий. Под воздействием высокой напряженности электрического поля происходит миграция ионов кислорода, что приводит к формированию каналов проводимости, увеличивающих проводимость материала. При изменении направления или величины электрического поля эти каналы могут разрушаться, возвращая материал в состояние с высоким сопротивлением. Кроме того, Джоулев нагрев, возникающий при высокой напря-

женности поля, способствует активации ионов кислорода и их миграции, что усиливает процессы образования и разрушения проводящих каналов, а также влияет на устойчивость переключения. Эти механизмы делают TiO_2 перспективным материалом для создания мемристоров с высокой надежностью и производительностью.

Для инициирования резистивного переключения в диоксиде титана необходимо достижение определенной пороговой напряженности электрического поля, которая зависит от таких параметров, как толщина активного слоя и геометрия электродов [25–27]. При превышении пороговой напряженности поля начинается процесс формирования каналов проводимости, что сопровождается резким снижением сопротивления активного слоя. Однако чрезмерно высокая напряженность поля может привести к неконтролируемому формированию множественных нитей, что негативно сказывается на стабильности и долговечности устройства. Кроме того, высокие напряженности поля могут вызывать деградацию материала, например, из-за электромиграции ионов или локального перегрева, что приводит к необратимым изменениям структуры активного слоя. Таким образом, при проектировании наноразмерных мемристорных структур критически важно понимать характер распределения электрического поля в активном слое и контролировать его напряженность для обеспечения стабильной работы устройства.

Важным аспектом при проектировании мемристоров является выбор материалов для электродов, поскольку их свойства оказывают влияние на характеристики прибора [28, 29]. В данном исследовании в качестве материала для верхнего электрода была выбрана платина (Pt) из-за ее высокой химической стабильности, низкого удельного сопротивления и устойчивости к окислению даже в агрессивных средах [30]. На верхний электрод подавалось напряжение до 5 В, а нижний титановый электрод был заземлен. Для минимизации влияния внешних факторов, таких как окисление поверхности или адсорбция молекул из окружающей среды, вся конструкция была помещена в вакуумную среду. При моделировании учитывалось, что верхний электрод локально погружен в активный слой на небольшую глубину, как показано на рис. 1. Одина из ВОНС имела фиксированный радиус острия (10 нм), а радиус острия второй ВОНС изменялся от 10 нм до 50 нм. Толщина оксидного слоя (TiO_2) при моделировании изменялась от 3 нм до 50 нм.

Основной целью работы является исследование влияния радиуса ВОНС и толщины оксидного слоя на распределение электрического поля в активном слое. Изменение радиуса кривизны ВОНС и толщины оксидного слоя может существенно влиять на локальную концентрацию поля. Распределение напряженности электрического поля в активном слое TiO_2 является ключевым фактором, определяющим эффективность и надежность мемристора.

Результаты и обсуждение. На основе результатов численного моделирования наноразмерной мемристорной ячейки были получены пространственные распределения напряженности электрического поля в межэлектродном зазоре (рис. 2). Анализ полученных данных выявил, что максимальные значения напряженности электрического поля сосредоточены в области интерфейса верхнего электрода, а именно вблизи периметра зоны контакта ВОНС с оксидной пленкой. Локализация напряженности поля обусловлена геометрическими особенностями конструкции, в том числе радиусом ВОНС и толщиной активного слоя, а также свойствами материалов, используемых в конструкции. Такое распределение напряженности поля необходимо для понимания механизмов резистивного переключения, поскольку именно в областях с высокой напряженностью поля начинаются процессы образования ионов и последующей их миграции с формированием наноразмерных каналов проводимости.

Наблюдаемое увеличение напряженности поля в приконтактной области связано с эффектом концентрации электрического поля, который возникает из-за резкого изменения геометрии на границе контакта ВОНС и оксидного слоя (рис. 3).

Особенно выраженно этот эффект проявляется при наноразмерных радиусах ВОНС, где локальная кривизна поверхности способствует усилению поля. Увеличение толщины оксидной пленки приводит к тому, что локальное усиление напряженности электрического поля по периметру контакта ВОНС с оксидом становится неоднородным в пределах каждой ВОНС. Поле усиливается в направлении от соседней ВОНС наружу. Выявлено, что у нижнего интерфейса также появляются локальные участки, где наблюдается усиление напряженности электрического поля. Понимание процессов распределения на-

пряженности электрического поля у нижнего электрода также важно, так как локализованное электрическое поле у нижнего электрода будет влиять на процессы генерации и рекомбинации вакансий, способствующих образованию/разрушению проводящих каналов проводимости.

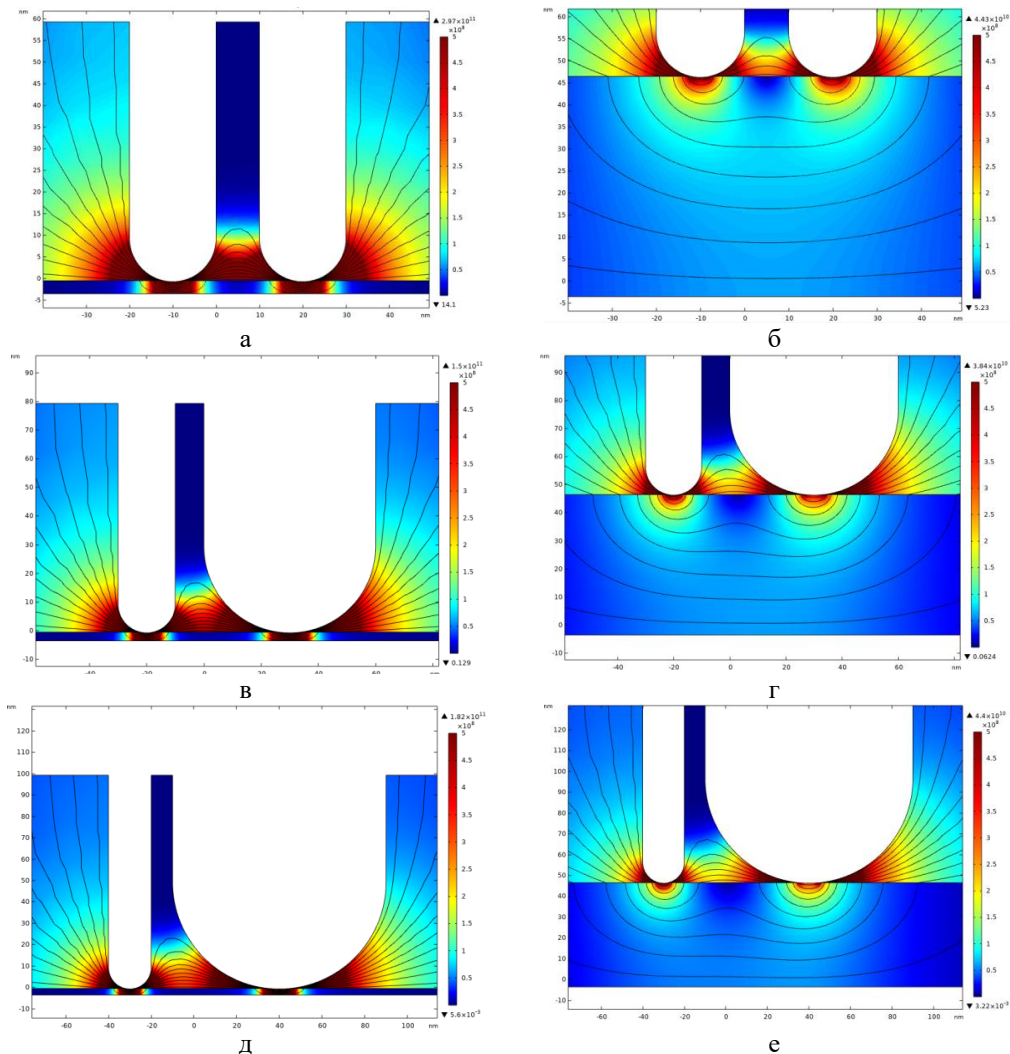


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля в мемристорной структуре при различных значениях радиусов ВОНС и толщины оксидного слоя:

а – $R1 = 10$ нм, $R2 = 10$ нм, $dTiO_2 = 3$ нм; б – $R1 = 10$ нм, $R2 = 10$ нм, $dTiO_2 = 50$ нм;
 в – $R1 = 10$ нм, $R2 = 30$ нм, $dTiO_2 = 3$ нм; г – $R1 = 10$ нм, $R2 = 30$ нм, $dTiO_2 = 50$ нм;
 д – $R1 = 10$ нм, $R2 = 50$ нм, $dTiO_2 = 3$ нм; е – $R1 = 10$ нм, $R2 = 50$ нм, $dTiO_2 = 50$ нм

На основе полученных данных были получены зависимости максимальной напряженности электрического поля, локализованного по периметру контактов ВОНС с оксидом, а также в центральной части этих контактов (рис. 4). Так как поле неоднородно распределяется по периметру контакта ВОНС с оксидной пленкой, то на зависимостях (рис. 4) представлены зависимости для внутренних и внешних участков интерфейса каждой из ВОНС. На рис. 4,г представлена зависимость напряженности электрического поля для центральных точек интерфейсов.

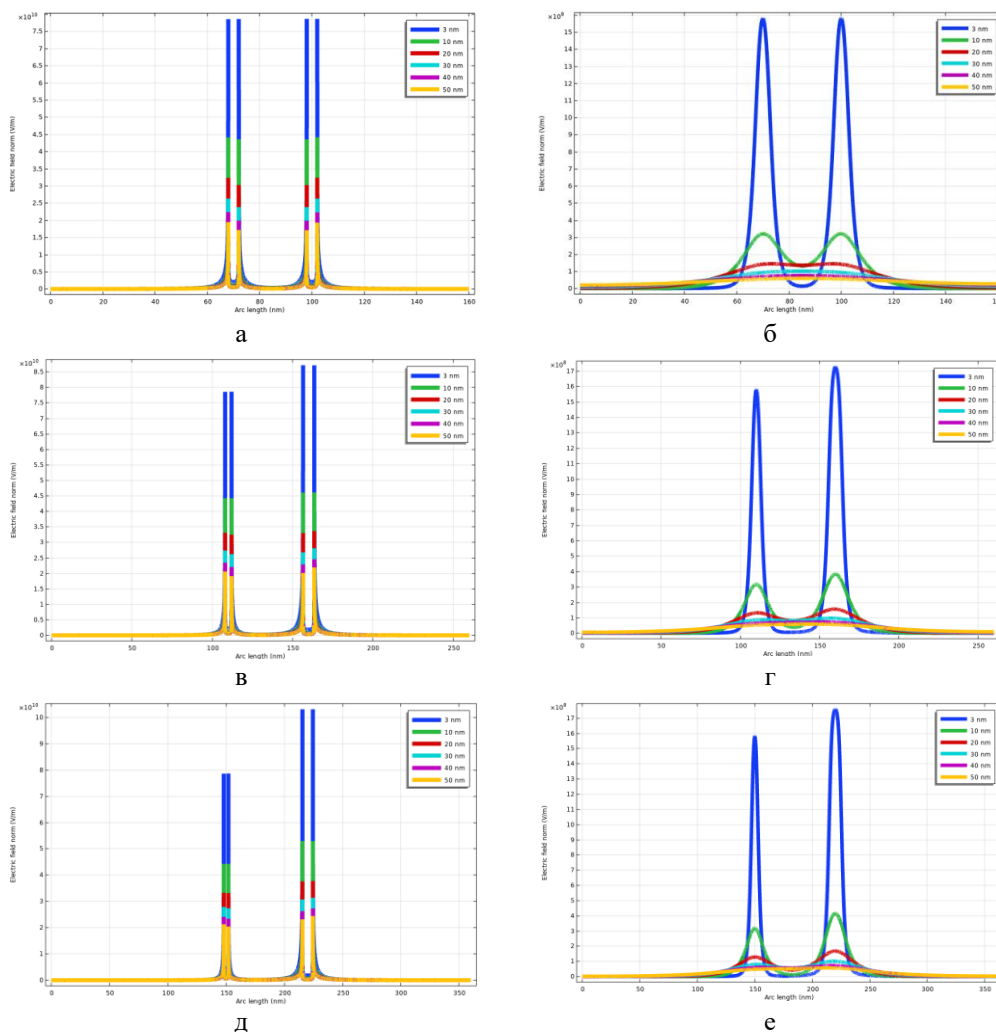


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля вдоль поверхности оксидной пленки мемристорной структуры при различных значениях радиусов ВОНС и толщины оксидного слоя ($d\text{TiO}_2 = 3\text{--}50$ нм):

a – сверху, $R1 = 10$ нм, $R2 = 10$ нм; *б* – снизу, $R1 = 10$ нм, $R2 = 10$ нм;
в – сверху, $R1 = 10$ нм, $R2 = 30$ нм; *г* – снизу, $R1 = 10$ нм, $R2 = 30$ нм;
д – сверху, $R1 = 10$ нм, $R2 = 50$ нм; *е* – снизу, $R1 = 10$ нм, $R2 = 50$ нм

В результате анализа полученных зависимостей можно сделать вывод от том, что увеличение толщины оксидной пленки приводит к локальным неоднородностям напряженности электрического поля у поверхности профилированного верхнего электрода. Неоднородность наблюдается как при ВОНС разного радиуса, так и при идентичных параметрах ВОНС. Неоднородность поля по периметру интерфейса достигает значений 4,4-13,4%. Уменьшение толщины оксидной пленки с 50 до 3 нм способствует возрастанию максимальной напряженности электрического поля по периметру верхнего интерфейса до 4,56 раз и в центре интерфейса – до 5,4 раз. Разница напряженности электрического поля между ВОНС может достигать 31%.

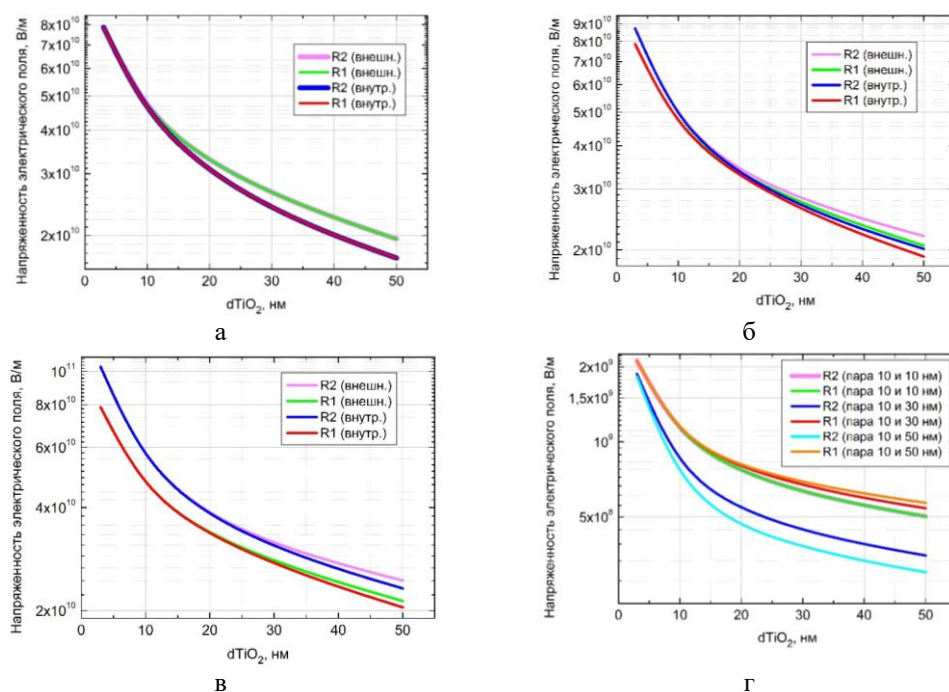


Рис. 4. Зависимости напряженности электрического у инсерфейса ВОНС/оксид от толщины оксидного слоя ($d\text{TiO}_2 = 3\text{--}50$ нм): а – периметр, $R1 = 10$ нм, $R2 = 10$ нм; б – периметр, $R1 = 10$ нм, $R2 = 30$ нм; в – периметр, $R1 = 10$ нм, $R2 = 50$ нм; г – центр, $R1 = 10$ нм, $R2 = 10\text{--}50$ нм

Закключение. В результате исследования показано, что использование профилированных электродов в виде ВОНС с наноразмерным радиусом острия обеспечивает локализацию напряженности электрического поля в заданных областях, что способствует более контролируемому процессу формирования наноразмерных каналов проводимости в мемристорных структурах. Результаты моделирования показали, что уменьшение толщины оксидного слоя приводит к увеличению эффективной напряженности электрического поля, что в свою очередь позволяет снизить приложенное напряжение, необходимое для достижения порогового значения, при котором происходит резистивное переключение. Обеспечение условий для увеличения напряженности электрического поля способствует ускоренной миграции ионов кислорода и процессу формирования проводящих нитей, что приводит к сокращению времени переключения между состояниями с высоким и низким сопротивлением. Это открывает перспективы для создания быстродействующих мемристорных устройств.

Разработка мемристорных структур с профилированными электродами имеет потенциал для повышения производительности, надежности и функциональности устройств, используемых в сенсорике и адаптивных системах управления в робототехнике. Такие структуры позволяют реализовывать более сложные и гибкие схемы обработки информации, что особенно актуально для создания интеллектуальных систем, способных адаптироваться к изменяющимся условиям. Полученные результаты исследований позволяют оптимизировать геометрические параметры наноразмерных мемристоров, включая толщину оксидного слоя и форму профилированных электродов, что является ключевым фактором для повышения их эффективности, стабильности и интеграции в современные электронные системы, энергоэффективные и высокопроизводительные устройства хранения и обработки информации, а также для создания нейроморфных систем, имитирующих принципы работы биологических нейронных сетей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-00306, <https://rscf.ru/project/24-79-00306/> в Южном федеральном университете.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Haleem A., Javaid M., and Khan I.H. Current status and applications of Artificial Intelligence (AI) in medical field: An overview // *Current Medicine Research and Practice*. – 2019. – Vol. 9, No. 6. – P. 231-237.
2. Javaid M., Haleem A., Singh R.P., and Suman R. Artificial intelligence applications for industry 4.0: A literature-based study // *Journal of Industrial Integration and Management*. – 2022. – Vol. 7, No. 01. – P. 83-111.
3. Holmes W., and Tuomi I. State of the art and practice in AI in education // *European journal of education*. – 2022. – Vol. 57, No. 4. – P. 542-570.
4. Seok H., Lee D., Son S., Choi H., Kim G., and Kim T. Beyond von Neumann architecture: brain-inspired artificial neuromorphic devices and integrated computing // *Advanced Electronic Materials*. – 2024. – Vol. 10, No. 8. – P. 2300839.
5. Kumar S., Wang X., Strachan J. P., Yang Y., and Lu W.D. Dynamical memristors for higher-complexity neuromorphic computing // *Nature Reviews Materials*. – 2022. – Vol. 7, No. 7. – P. 575-591.
6. Park S. O., Jeong H., Park J., Bae J., and Choi S. Experimental demonstration of highly reliable dynamic memristor for artificial neuron and neuromorphic computing // *Nature Communications*. – 2022. – Vol. 13, No. 1. – P. 2888.
7. Chua L. Resistance switching memories are memristors // *Handbook of memristor networks*. – 2019. – P. 197-230.
8. Avilov V.I., Ageev O.A., Jityaev I.L., Kolomyitsev A.S., and Smirnov V.A. Investigation of memristor effect on the titanium nanowires fabricated by focused ion beam // *International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016*. – SPIE, 2016. – Vol. 10224. – P. 205-209.
9. Hong Q., Zhao L., and Wang X. Novel circuit designs of memristor synapse and neuron // *Neurocomputing*. – 2019. – Vol. 330. – P. 11-16.
10. Avilov V.I., Tominov R.V., Vakulov Z.E., Zhavoronkov L.G., and Smirnov V.A. Titanium oxide artificial synaptic device: Nanostructure modeling and synthesis, memristive cross-bar fabrication, and resistive switching investigation // *Nano Research*. – 2023. – Vol. 16. – P. 10222-10233.
11. Avilov V.I., Tominov R.V., Vakulov Z.E., Rodriguez D.J., Polupanov N.V., and Smirnov V.A. Nanoscale titanium oxide memristive structures for neuromorphic applications: atomic force anodization techniques, modeling, chemical composition, and resistive switching properties // *Nanomaterials*. – 2025. – Vol. 15 (1). – P. 75.
12. Yang C., Wang H., Cao Z., Chen X., Zhou G., Zhao H., Wu Zh., Zhao Y., and Sun B. Memristor-based bionic tactile devices: Opening the door for next-generation artificial intelligence // *Small*. – 2024. – Vol. 20, No. 19. – P. 2308918.
13. Du S., Song Y., Yuan J., Hao R., Wu L., Lei S., and Hu W. An artificial universal tactile nociceptor based on 2D polymer film memristor arrays with tunable resistance switching behaviors // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2024. – Vol. 16, No. 26. – P. 33907-33916.
14. Mikhaylov A., Belov A., Korolev D., Antonov I., Kotomina V., Kotina A., Gryaznov E., Sharapov A., Koryazhkina M., Kryukov R., Zubkov S., Sushkov A., Pavlov D., Tikhov S., Morozov O., and Tetelbaum D. Multilayer metal-oxide memristive device with stabilized resistive switching // *Advanced materials technologies*. – 2020. – Vol. 5, No. 1. – P. 1900607.
15. Brivio S., Spiga S., and Ielmini D. HfO₂-based resistive switching memory devices for neuromorphic computing // *Neuromorphic Computing and Engineering*. – 2022. – Vol. 2, No. 4. – P. 042001.
16. Saenko A.V., Tominov R.V., Jityaev I.L., Vakulov Z.E., Avilov V.I., Polupanov N.V., and Smirnov V.A. Transparent zinc oxide memristor structures: Magnetron sputtering of thin films, resistive switching investigation, and crossbar array fabrication // *Nanomaterials*. – 2024. – Vol. 14, No. 23. – P. 1901.
17. Abunahla H., Mohammad B., Homouz D., and Okelly C.J. Modeling valance change memristor device: Oxide thickness, material type, and temperature effects // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. – 2016. – Vol. 63, No. 12. – P. 2139-2148.
18. Ouaja Rzig F., Mbarek K., Ghedira S., and Besbes K. The basic I–V characteristics of memristor model: simulation and analysis // *Applied Physics A*. – 2017. – Vol. 123. – P. 1-8.
19. Singh J., and Raj B. Comparative analysis of memristor models and memories design // *Journal of Semiconductors*. – 2018. – Vol. 39, No. 7. – P. 074006.
20. Yang J.J., Miao F., Pickett M.D., Ohlberg D.A., Stewart D.R., Lau C.N., and Williams R.S. The mechanism of electroforming of metal oxide memristive switches // *Nanotechnology*. – 2009. – Vol. 20, No. 21. – P. 215201.
21. Miao F., Strachan J.P., Yang J., Zhang M.X., Goldfarb I., Torrezan A.C., Eschbach P., Kelley R.D., Medeiros-Ribeiro G. and Williams R.S. Anatomy of a nanoscale conduction channel reveals the mechanism of a high-performance memristor // *Advanced Materials*. – 2011. – Vol. 23, No. 47. – P. 5633-5640.
22. Gale E. TiO₂-based memristors and ReRAM: materials, mechanisms and models (a review) // *Semiconductor Science and Technology*. – 2014. – Vol. 29, No. 10. – P. 104004.
23. Gul F. Nano-scale single layer TiO₂-based artificial synaptic device // *Applied Nanoscience*. – 2020. – Vol. 10, No. 2. – P. 611-616.

24. Jityaev I., Avilov V., Avakyan A., Fedotov A., Prakash C., and Smirnov V. Memristive structures based on TiO₂ nanodots: Simulation, formation and resistive switching // 2023 7th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). – IEEE, 2023. – P. 108-111.
25. Светличный А.М., Спиридонов О.Б., Житяев И.Л., Волков Е.Ю., и Демьяненко М.В. Моделирование распределения напряженности электрического поля в наноструктурах с катодом прямоугольного сечения на основе пленок графена на SiC // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 2 (163). – С. 225-236.
26. Bafrani H.A., Ebrahimi M., Shouraki S.B., & Moshfegh A.Z. A facile approach for reducing the working voltage of Au/TiO₂/Au nanostructured memristors by enhancing the local electric field // *Nanotechnology*. – 2017. – Vol. 29, No. 1. – P. 015205.
27. Li C., Xu T., Pan R., Bao S., Yin K., Shen J., Zhu Y., Yatong Zhu, Hou S., and Sun L. Electric field-dependent evolution dynamics of conductive filaments in 2d material-based planar memristors // *ACS nano*. – 2024. – Vol. 18, No. 46. – P. 32196-32204.
28. Ge N., Zhang M.X., Zhang L., Yang J.J., Li Z., and Williams R.S. Electrode-material dependent switching in TaO_x memristors // *Semiconductor Science and Technology*. – 2014. – Vol. 29, No. 10. – P. 104003.
29. Khrapovitskaya Y.V., Maslova N. E., Grishchenko Y.V., Demin V.A., and Zhanavskina M.L. The effect of the memristor electrode material on its resistance to degradation under conditions of cyclic switching // *Technical Physics Letters*. – 2014. – Vol. 40. – P. 317-319.
30. Haidry A.A., Ebach-Stahl A., Saruhan B. Effect of Pt/TiO₂ interface on room temperature hydrogen sensing performance of memristor type Pt/TiO₂/Pt structure // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2017. – Vol. 253. – P. 1043-1054.

REFERENCES

1. Haleem A., Javaid M., and Khan I.H. Current status and applications of Artificial Intelligence (AI) in medical field: An overview, *Current Medicine Research and Practice*, 2019, Vol. 9, No. 6, pp. 231-237.
2. Javaid M., Haleem A., Singh R.P., and Suman R. Artificial intelligence applications for industry 4.0: A literature-based study, *Journal of Industrial Integration and Management*, 2022, Vol. 7, No. 01, pp. 83-111.
3. Holmes W., and Tuomi I. State of the art and practice in AI in education, *European journal of education*, 2022, Vol. 57, No. 4, pp. 542-570.
4. Seok H., Lee D., Son S., Choi H., Kim G., and Kim T. Beyond von Neumann architecture: brain-inspired artificial neuromorphic devices and integrated computing, *Advanced Electronic Materials*, 2024, Vol. 10, No. 8, pp. 2300839.
5. Kumar S., Wang X., Strachan J. P., Yang Y., and Lu W.D. Dynamical memristors for higher-complexity neuromorphic computing, *Nature Reviews Materials*, 2022, Vol. 7, No. 7, pp. 575-591.
6. Park S. O., Jeong H., Park J., Bae J., and Choi S. Experimental demonstration of highly reliable dynamic memristor for artificial neuron and neuromorphic computing, *Nature Communications*, 2022, Vol. 13, No. 1, pp. 2888.
7. Chua L. Resistance switching memories are memristors, *Handbook of memristor networks*, 2019, pp. 197-230.
8. Avilov V.I., Ageev O.A., Jityaev I.L., Kolomyitsev A.S., and Smirnov V.A. Investigation of memristor effect on the titanium nanowires fabricated by focused ion beam, *International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016*. SPIE, 2016, Vol. 10224, pp. 205-209.
9. Hong Q., Zhao L., and Wang X. Novel circuit designs of memristor synapse and neuron // *Neurocomputing*. – 2019. – Vol. 330. – P. 11-16.
10. Avilov V.I., Tominov R.V., Vakulov Z.E., Zhavoronkov L.G., and Smirnov V.A. Titanium oxide artificial synaptic device: Nanostructure modeling and synthesis, memristive cross-bar fabrication, and resistive switching investigation, *Nano Research*, 2023, Vol. 16, pp. 10222-10233.
11. Avilov V.I., Tominov R.V., Vakulov Z.E., Rodriguez D.J., Polupanov N.V., and Smirnov V.A. Nanoscale titanium oxide memristive structures for neuromorphic applications: atomic force anodization techniques, modeling, chemical composition, and resistive switching properties, *Nanomaterials*, 2025, Vol. 15 (1), pp. 75.
12. Yang C., Wang H., Cao Z., Chen X., Zhou G., Zhao H., Wu Zh., Zhao Y., and Sun B. Memristor-based bionic tactile devices: Opening the door for next-generation artificial intelligence, *Small*, 2024, Vol. 20, No. 19, pp. 2308918.
13. Du S., Song Y., Yuan J., Hao R., Wu L., Lei S., and Hu W. An artificial universal tactile nociceptor based on 2D polymer film memristor arrays with tunable resistance switching behaviors, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, Vol. 16, No. 26, pp. 33907-33916.
14. Mikhaylov A., Belov A., Korolev D., Antonov I., Kotomina V., Kotina A., Gryaznov E., Sharapov A., Koryazhnikina M., Kryukov R., Zubkov S., Sushkov A., Pavlov D., Tikhov S., Morozov O., and Tetelbaum D. Multilayer metal-oxide memristive device with stabilized resistive switching, *Advanced materials technologies*, 2020, Vol. 5, No. 1, pp. 1900607.

15. Brivio S., Spiga S., and Ielmini D. HfO₂-based resistive switching memory devices for neuromorphic computing, *Neuromorphic Computing and Engineering*, 2022, Vol. 2, No. 4, pp. 042001.
16. Saenko A.V., Tominov R.V., Jityaev I.L., Vakulov Z.E., Avilov V.I., Polupanov N.V., and Smirnov V.A. Transparent zinc oxide memristor structures: Magnetron sputtering of thin films, resistive switching investigation, and crossbar array fabrication, *Nanomaterials*, 2024, Vol. 14, No. 23, pp. 1901.
17. Abunahla H., Mohammad B., Homouz D., and Okelly C.J. Modeling valance change memristor device: Oxide thickness, material type, and temperature effects, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2016, Vol. 63, No. 12, pp. 2139-2148.
18. Ouaja Rzig F., Mbarek K., Ghedira S., and Besbes K. The basic I–V characteristics of memristor model: simulation and analysis, *Applied Physics A*, 2017, Vol. 123, pp. 1-8.
19. Singh J., and Raj B. Comparative analysis of memristor models and memories design, *Journal of Semiconductors*, 2018, Vol. 39, No. 7, pp. 074006.
20. Yang J.J., Miao F., Pickett M.D., Ohlberg D.A., Stewart D.R., Lau C.N., and Williams R.S. The mechanism of electroforming of metal oxide memristive switches, *Nanotechnology*, 2009, Vol. 20, No. 21, pp. 215201.
21. Miao F., Strachan J.P., Yang J., Zhang M.X., Goldfarb I., Torrezan A.C., Eschbach P., Kelley R.D., Medeiros-Ribeiro G. and Williams R.S. Anatomy of a nanoscale conduction channel reveals the mechanism of a high-performance memristor, *Advanced Materials*, 2011, Vol. 23, No. 47, pp. 5633-5640.
22. Gale E. TiO₂-based memristors and ReRAM: materials, mechanisms and models (a review), *Semiconductor Science and Technology*, 2014, Vol. 29, No. 10, pp. 104004.
23. Gul F. Nano-scale single layer TiO₂-based artificial synaptic device, *Applied Nanoscience*, 2020, Vol. 10, No. 2, pp. 611-616.
24. Jityaev I., Avilov V., Avakyan A., Fedotov A., Prakash C., and Smirnov V. Memristive structures based on TiO₂ nanodots: Simulation, formation and resistive switching, *2023 7th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA)*. IEEE, 2023, pp. 108-111.
25. Svetlichnyy A.M., Spiridonov O.B., Zhityaev I.L., Volkov E.Yu., i Dem'yanenko M.V. Modelirovanie raspredeleniya napryazhennosti elektricheskogo polya v nanostrukturakh s katodom pryamo-ugol'nogo secheniya na osnove plenok grafena na SiC [Simulation of the electric field distribution in nanostructures with rectangular cross-section field emission cathode based on graphene film on SiC], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 2 (163), pp. 225-236.
26. Bafrani H.A., Ebrahimi M., Shouraki S.B., & Moshfegh A.Z. A facile approach for reducing the working voltage of Au/TiO₂/Au nanostructured memristors by enhancing the local electric field, *Nanotechnology*, 2017, Vol. 29, No. 1, pp. 015205.
27. Li C., Xu T., Pan R., Bao S., Yin K., Shen J., Zhu Y., Yatong Zhu, Hou S., and Sun L. Electric field-dependent evolution dynamics of conductive filaments in 2d material-based planar memristors, *ACS nano*, 2024, Vol. 18, No. 46, pp. 32196-32204.
28. Ge N., Zhang M.X., Zhang L., Yang J.J., Li Z., and Williams R.S. Electrode-material dependent switching in TaOx memristors, *Semiconductor Science and Technology*, 2014, Vol. 29, No. 10, pp. 104003.
29. Khrapovitskaya Y.V., Maslova N. E., Grishchenko Y.V., Demin V.A., and Zhanavskiy M.L. The effect of the memristor electrode material on its resistance to degradation under conditions of cyclic switching, *Technical Physics Letters*, 2014, Vol. 40, pp. 317-319.
30. Haidry A.A., Ebach-Stahl A., Saruhan B. Effect of Pt/TiO₂ interface on room temperature hydrogen sensing performance of memristor type Pt/TiO₂/Pt structure, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, Vol. 253, pp. 1043-1054.

Житяев Игорь Леонидович – Южный федеральный университет; e-mail: izhityaev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра радиотехнической электроники и наноэлектроники; к.т.н.; доцент.

Картель Максим Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: mkartel@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; научно-исследовательская лаборатория "Нейроэлектроника и мемристивные наноматериалы"; лаборант-исследователь.

Житяева Юлия Юрьевна – Южный федеральный университет; e-mail: zhityaeva@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; научно-исследовательская лаборатория технологии функциональных наноматериалов; м.н.с.

Авакян Артём Андреевич – Южный федеральный университет; e-mail: artav@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра радиотехнической электроники и наноэлектроники; аспирант.

Смирнов Владимир Александрович – Южный федеральный университет; e-mail: vasmirmov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра радиотехнической электроники и наноэлектроники; к.т.н.; доцент; зав. кафедрой.

Jityaev Igor Leonidovich – Southern Federal University; e-mail: izhityaev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Radio Engineering Electronics and Nanoelectronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kartel Maksim Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: mkartel@sfedu.ru; Taganrog, Russia; research Laboratory "Neuroelectronics and memristive nanomaterials"; research assistant.

Jityaeva Yulia Yurievna – Southern Federal University; e-mail: zhityaeva@sfedu.ru; Taganrog, Russia; research Laboratory of Functional Nanomaterials Technology; junior researcher.

Avakyan Artem Andreevich – Southern Federal University; e-mail: artav@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Radio Engineering Electronics and Nanoelectronics; postgraduate student.

Smirnov Vladimir Aleksandrovich – Southern Federal University; e-mail: vasmirnov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Radio Engineering Electronics and Nanoelectronics; cand. of eng. sc.; associate professor; head of department.

УДК 004.81: 004.85, 339.97

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-40-51

З.В. Нагоев, О.З. Загазежева, К.Ч. Бжихатлов, И.А. Мамбетов

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СБОРА УРОЖАЯ

В условиях необходимости обеспечения продовольственной безопасности актуальными становятся задачи оптимизации производственных процессов в аграрном секторе. Например, учитывая нехватку трудовых ресурсов в сельском хозяйстве, требуется разработка и внедрение робототехнических систем для автоматизации процессов ухода за растениями, сбора урожая и его переработки. В статье представлены результаты разработки автономного робота для сбора яблок, созданного на базе универсального антропоморфного робота, разработанного в Кабардино-Балкарском научном центре РАН. Робот оснащен двумя многозвенными манипуляторами, схожими с руками человека, что позволяет ему выполнять сложные задачи по сбору урожая. Для обеспечения интеллектуального управления всей системой используется мультиагентная нейрокognитивная архитектура, которая имитирует работу человеческого мозга и позволяет роботу адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды. Робот оснащен набором сенсоров, включая видеокамеры, ультразвуковые и инфракрасные дальномеры, лидар и энкодеры на приводах манипуляторов. Это позволяет ему точно определять местоположение яблок, оценивать их зрелость и планировать траекторию движения манипуляторов. Особое внимание уделено разработке захвата, который имитирует человеческую кисть и позволяет регулировать силу сжатия, что минимизирует риск повреждения плодов. Для управления роботом используется мультиагентная нейрокognитивная архитектура, которая обеспечивает автономное принятие решений на основе данных с сенсоров. Система способна строить карту местности, определять положение робота и планировать маршрут движения, а также распознавать яблоки и оценивать их состояние. В статье также рассмотрены проблемы, связанные с автоматизацией сбора урожая в сельском хозяйстве, включая нехватку трудовых ресурсов и потери урожая из-за неправильной эксплуатации техники. Авторы подчеркивают, что автоматизация и роботизация процессов уборки урожая имеют большой потенциал, особенно для культур, требующих индивидуального подхода, таких как фрукты и овощи. Представленный робот демонстрирует высокую эффективность в решении этих задач, что подтверждается результатами полевых испытаний. Разработанная система может быть адаптирована для работы с другими культурами, что делает ее универсальным решением для сельскохозяйственной отрасли.

Сельское хозяйство; робототехническая система; мультиагентная нейрокognитивная архитектура; экономическая эффективность; интеллектуальное управление; искусственный интеллект.

Z.V. Nagoev, O.Z. Zagazheva, K.Ch. Brzhihatlov, I.A. Mambetov

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT ROBOTIC HARVESTING SYSTEM

In the context of the need to ensure food security, the tasks of optimizing production processes in the agricultural sector are becoming relevant. For example, given the shortage of labor in agriculture, it is necessary to develop and implement robotic systems to automate the processes of plant care, harvesting and processing. The article presents the results of the development of an autonomous robot for picking apples, created on the basis of a universal anthropomorphic robot developed at the Kabardino-Balkarian

Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. The robot is equipped with two multi-link manipulators similar to human hands, which allows it to perform complex harvesting tasks. To ensure intelligent control of the entire system, a multi-agent neurocognitive architecture is used, which imitates the work of the human brain and allows the robot to adapt to changing environmental conditions. The robot is equipped with a set of sensors, including video cameras, ultrasonic and infrared rangefinders, lidar and encoders on the manipulator drives. This allows it to accurately determine the location of apples, assess their ripeness and plan the trajectory of the manipulators. Particular attention is paid to the development of a gripper that imitates a human hand and allows you to adjust the squeezing force, which minimizes the risk of damage to the fruit. A multi-agent neurocognitive architecture is used to control the robot, which provides autonomous decision-making based on sensor data. The system is able to build a map of the area, determine the position of the robot and plan a route, as well as recognize apples and assess their condition. The article also considers the problems associated with the automation of harvesting in agriculture, including a lack of labor and crop losses due to improper operation of equipment. The authors emphasize that automation and robotization of harvesting processes have great potential, especially for crops that require an individual approach, such as fruits and vegetables. The presented robot demonstrates high efficiency in solving these problems, which is confirmed by the results of field tests. The developed system can be adapted to work with other crops, which makes it a universal solution for the agricultural industry.

Agriculture; robotic system; multi-agent neurocognitive architecture; economic efficiency; intelligent control; artificial intelligence.

Введение. Для России, находящейся в условиях санкций, обеспечение продовольственной безопасности и увеличение объемов отечественного производства сельскохозяйственной продукции являются задачами критической важности. Учитывая санкционное давление и геополитическую напряженность, акцент на импортозамещение и наращивание внутреннего производства становится не просто желательным, а необходимым условием стабильности и независимости.

В цепочке производства сельскохозяйственной продукции, особое внимание следует уделить проблемам сбора урожая. Проблемы, связанные с уборкой урожая, многогранны и зависят от множества факторов, включая тип культуры, географическое расположение, климат, доступные ресурсы и технологии. В основном это трудовые ресурсы, например, по данным руководства союза «Садоводы Кубани», в 2024 году в Краснодарском крае для сбора урожая не хватало 2,5 тыс. человек для уборки урожая.

Также **потери урожая** могут возникать из-за неправильной эксплуатации уборочной техники или проблем с логистикой. Чтобы минимизировать потери, на всех этапах уборочной кампании необходима система управления и четкий контроль [1].

Автоматизация и роботизация процессов сбора урожая, благодаря своей повторяемости, имеет большой потенциал, но пока успешно реализована только для культур, созревающих одновременно и не требующих индивидуальной оценки (например, злаки и корнеплоды). Для уборки фруктов и овощей сложной формы и различной окраски возникают сложности, обусловленные необходимостью использования "умных" систем. Эти системы должны находить и определять местоположение плодов, оценивать их зрелость и безопасно собирать их, не повреждая ни плод, ни растение. Ключевая проблема – не в создании самого робота-манипулятора, а в его управлении и интеллектуальном обеспечении.

В мире множества попыток создания робототехнических систем для уборки плодово-овощной продукции, например прототипы таких роботов: Abundant Robotics (США) – робот для сбора яблок, FF Robotics (Израиль) – робот для сбора апельсинов, Agrobot (Испания) – робот для сбора клубники, Harvest CROO Robotics (США)-робот для сбора клубники, Cambridge Consultants (Великобритания) – разработки в области робототехники для сельского хозяйства, Root AI (США) (приобретена AppHarvest) – Робот Virgo для сбора томатов. К примеру, в статье [2] представлено биомиметическое роботизированное решение, охватывающее цикл "Восприятие-Действие" для сбора клубники в вертикальных фермах. Система использует условные Generative Adversarial Networks (GAN) для идентификации спелых плодов на основе синтетических данных, избегая трудоемкого сбора реальных данных. Локализация плодов выполняется с помощью стереокамеры, а действия робота, включая срезание стеблей, основаны на концепции Passive Motion Paradigm, вдохновленной нейронным контролем движений. Полевые испытания подтвердили эффективность системы в обнаружении плодов, работе со сложными структурами растительного покрова и бимануальной координации. Хотя решение ориентировано на

клубнику, ведутся исследования по адаптации системы для других культур, таких как томаты и сладкий перец, что демонстрирует потенциал для автоматизации сельскохозяйственных задач и снижения зависимости от ручного труда.

В работе [3] исследуется потенциал информационных и коммуникационных технологий (ИКТ) в традиционном сельском хозяйстве, выделяя такие технологии, как робототехника, IoT, машинное обучение и искусственный интеллект (ИИ), а также их применение для мониторинга посевов, оптимизации урожайности и управления сельскохозяйственными процессами. Особое внимание уделено использованию дронов и передовых IoT-платформ. Авторы проводят детальный анализ последних исследований, выделяя текущие и будущие тенденции в области ИИ, а также описывают ключевые задачи, такие как обработка больших объемов данных (data tsunami) и развитие M2M-систем. Отмечается, что цифровизация сельского хозяйства открывает новые возможности для фермеров и потребителей, но также требует решения ряда технологических и исследовательских задач для успешного внедрения инноваций. В статье [4, 5] проводится анализ использования информационно-коммуникационных технологий в организациях предпринимательского сектора Российской Федерации; востребованность новых технологий у хозяйствующих субъектов АПК России; выпуск бакалавров, специалистов, магистров по основным направлениям подготовки и специальностям в области информационно-коммуникационных технологий. Резюмируется, что в результате внедрения инновационных методов цифровой экономики будут достигнуты определенные результаты, связанные с ростом эффективности сельскохозяйственного производства. В первую очередь, это: рост уровня производительности труда в аграрном секторе экономики; снижение потребности в различного вида ресурсах за счет их более экономичного потребления по сравнению с традиционными технологиями; повышение безопасности и условий труда в сельскохозяйственных организациях за счет применения робототехники на вредных и опасных производствах; снижение ущерба, связанного с негативным воздействием человеческого фактора.

К сожалению, российский рынок робототехники для сельского хозяйства, особенно для уборки фруктов, пока не очень развит по сравнению с мировыми лидерами (США, Европа, Израиль). Причины – более поздний старт, меньший объем инвестиций, технологические ограничения. Подобные проблемы также выявлены автором в [6]. В статье анализируются перспективы внедрения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в сельское хозяйство Свердловской области, что актуально в связи с быстрым развитием цифровых технологий и неопределенностью их применения в аграрном секторе [7]. На основе анализа публикаций в WoS и опроса руководителей 55 сельскохозяйственных организаций выявлены основные сферы применения ИИ, такие как животноводство (26,0%) и мониторинг благополучия животных (18,5%). Респонденты ожидают увеличения производства продукции (23,2%) и снижения затрат (20,3%), а также считают, что ИИ изменит сельскохозяйственное производство, сократит низкоквалифицированный труд и создаст новые рабочие места в интеллектуальной сфере. Однако, несмотря на положительное восприятие, лишь 9,8% опрошенных уже используют эти технологии. Основными препятствиями являются высокая стоимость и недостаток финансирования, для преодоления которых предлагается увеличить государственную поддержку и повысить квалификацию персонала. Внедрение ИИ позволит повысить точность прогнозов, привлечь инвестиции и увеличить рентабельность производства [8, 9]. Поэтому готового, серийно выпускаемого робота для уборки плодоовощной проекции, который можно просто купить, пока не существует. Статьи [10, 11] исследуют проблемы разработки, внедрения и использования систем искусственного интеллекта (ИИ) в сельском хозяйстве. Авторы анализируют теоретические подходы к определению ИИ и классификации его видов, отмечая, что в настоящее время речь идет преимущественно о «узком» ИИ, предназначенном для решения конкретных задач. В агропромышленном секторе ИИ применяется в двух формах: как программное обеспечение и как роботизированные системы. В ней рассмотрены успешные примеры внедрения таких технологий в сельскохозяйственное производство. Также это проблема хорошо раскрывается в работе [12]. Искусственный интеллект (ИИ) играет важную роль в развитии умного сельского хозяйства, способствуя его устойчивости.

Технологии ИИ активно применяются в таких ключевых областях, как управление почвой и орошением, прогнозирование погоды, мониторинг роста растений, выявление заболеваний и управление скотом [13]. В статьях [14, 15] рассматриваются современные методы ИИ, используемые в этих сферах, с акцентом на применяемые алгоритмы и их влияние на эффективность сельскохозяйственных процессов.

В России в вузах совместно с крупными зарубежными компаниями есть прецеденты разработки в области роботизированных систем для сельского хозяйства, в том числе для уборки фруктов. Эти разработки представляют собой прототипы роботов по уборке яблок.

Аппаратная реализация автономного робота для сбора урожая. Для обеспечения автономного ухода за плодовыми садами необходимо обеспечить мониторинг состояния деревьев, внесение удобрений и лекарственных средств, ухода за деревьями и сбор урожая. Учитывая достаточный разброс выполняемых в саду задач, система роботизации должна состоять либо из гетерогенного набора специализированных роботов для мониторинга, полива, внесения различных препаратов, обрезки деревьев и сбора урожая или использовать универсальных роботов, способных выполнять все эти задачи. В первом случае для работы в интенсивных яблоневых садах (характерных для Кабардино-Балкарской республики) можно использовать систему мониторинга на основе нескольких БПЛА с RGB или мультиспектральными камерами, данные дистанционного зондирования земли, информацию с метеостанций и данные лабораторных анализов проб почвы или самих деревьев. Соответственно, для ухода за деревьями и внесения препаратов необходимо использовать отдельные робототехнические решения. Подобная система на примере кукурузы описана в [16]. Отдельно стоит рассмотреть возможность использования универсальных исполнителей, например автономных человекоподобных роботов для выполнения всего спектра задач в саду. В частности, рассматривается возможность использования универсального робота для сбора яблок, как достаточно сложной для автоматизации задачи.

Для обеспечения автоматизации сбора урожая в яблоневых садах предполагается использование автономных роботов, устанавливаемых на уже существующие транспортные платформы (трактора и мини комбайны для работы в садах), т.е. в местах, где сейчас используется человеческий труд. Робот должен обеспечивать распознавание яблок, оценку их состояния, захват и перемещение в область сбора (ящик или конвейер) без повреждения плодов. Для этого на роботе установлен набор сенсоров, состоящий из двух видеокамер, набора ультразвуковых и инфракрасных датчиков, лидар и набор энкодеров на приводах манипуляторов. Отдельно стоит отметить необходимость обеспечения ориентации и навигации для транспортной системы, для чего используется навигационный датчик (GPS и ГЛОНАСС) и инерциальный датчик с магнетометром (10 осевой IMU сенсор). Принципиальная схема робота приведена на рис. 1.



Рис. 1. Принципиальная схема универсального робота для плодовых садов

Робот для сбора урожая изготовлен на базе многоцелевой исследовательской робототехнической платформы Муром-ИСП, разработанной в КБНЦ РАН. Робот представляет собой транспортную платформу с двумя приведенными и двумя поворотными колесами.

ми. На транспортной платформе установлен человекоподобный модуль с двумя манипуляторами в форме рук. Сзади установлен блок, где размещены все тяжелые двигатели. Манипуляторы приводятся в движение за счет тросовых приводов, что позволяет заметно облегчить конструкцию. В «голове» робота расположены камеры, микрофоны, динамики и экран. Концепт внешнего вида прототипа робота для сбора урожая приведен на рис. 2. Стоит отметить возможность отделения верхней части робота с манипуляторами и использования других вариантов транспортной платформы.



Рис. 2. Концепт внешнего вида универсального робота для плодовых садов

Для обеспечения сохранности яблок при сборе используется манипулятор, захват которого изготовлен в виде кисти человека, где каждая фаланга имеет три ограниченные степени свободы. Трехмерная модель кисти приведена на рис. 3. Как видно из рисунка, в манипуляторе реализованы не только по три фаланги на палец, но и пястные кости человека. Каркас изготовлен из металла, а корпус из гибкого пластика или полимера. Размеры кисти составляют 18 см (длина ладони).

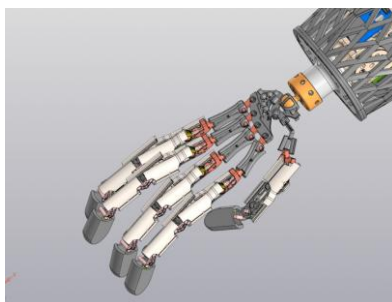


Рис. 3. Трехмерная модель захвата робота для сбора урожая

Схема устройства кисти на примере одной фаланги приведена на рис. 4. Сгиб каждой фаланги (на рисунке обозначена цифрой «1») управляется двумя тросами («3») с сервоприводами («4»), расположенными на предплечье робота. Все тросы протянуты внутри каркаса кисти и не мешают сбору урожая. Подобное решение, во-первых, позволяет минимизировать размер самой кисти и при этом обеспечивать контроль не только угла поворота фаланги, но и усилия, прилагаемого фалангой, кроме того, незначительное растяжение троса компенсирует неточности управления сервомоторами. Для отслеживания угла сгиба используются гибкие датчики деформации («5»), расположенные возле шарнира («2»). На частях манипулятора, непосредственно касающихся плодов устанавливается матрица датчиков нажатия, которая позволит определить форму яблока и обеспечит его перемещение без риска деформации. Матрица датчиков давления состоит из множества чувствительных датчиков магнитного поля и гибкой магнитной ленты, утопленных в мягкую основу (в прототипе использовался полимер на основе силикона).

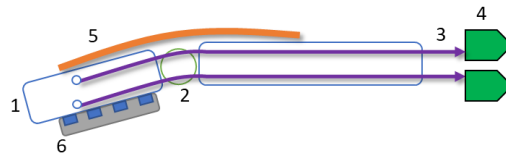


Рис. 4. Схема устройства фаланги на манипуляторе робота для сбора урожая:
1 – каркас фаланги; 2 – неразъемный трехосевой шарнир; 3 – тросы привода фаланги;
4 – серводвигатели фаланги; 5 – датчик сгиба фаланги (по одной из осей);
6 – матрица датчиков давления в полимерной оболочке

Наличие системы адометрии и матрицы датчиков давления позволят роботу «на ощупь» определять форму плода и подстраивать кисть под нее. При этом возможность регулировать степень сжатия пальцев позволит отрывать плод без риска его повреждения.

Мультиагентная нейрокогнитивная система управления автономным роботом для садоводства. Учитывая сложность задачи управления многозвенным манипулятором при работе с хрупкими объектами для обеспечения управления разработанной робототехнической системой необходимо реализовать интеллектуальную систему управления, которая в автономном режиме позволит захватывать и плоды и отделять их от веток. Кроме того, система управления должна отвечать за распознавание плодов, определения их положение, а также за навигацию и ориентацию робота. Для данного робота было решено использовать систему управления на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. Под ними понимается формализм искусственного интеллекта, позволяющий строить интеллектуальные системы продукционного типа для решения сложных задач в условиях неопределенности информации в проблемной среде. Архитектура имитирует работу головного мозга человека. Она организована в формате инварианта интеллектуального контура принятия решений. Инвариант включает в себя функциональные элементы когнитивной архитектуры, в которых размещаются рациональные программные агенты низкого уровня. Эти агенты синтезируют свое поведение с целью максимизации своих локальных целевых функций. Благодаря этому вся система в целом проявляет сложное и нетривиальное поведение, основанное на принципах мультиагентной самоорганизации, при движении к аттракторам. Аттракторы в данном контексте интерпретируются как семантически значимые состояния интеллектуального агента. В качестве целевой функции используется функция максимизации энергии, которая трактуется как описательная величина. Эта величина отражает способность агента влиять на окружающую среду, учитывая при этом энергетические затраты, необходимые для осуществления таких воздействий. На рис. 5 приведен интерфейс разработанного в КБНЦ РАН программного комплекса для моделирования и редактирования подобных архитектур. Предполагается, что мультиагентный подход при проектировании интеллектуальных систем позволит эффективно решать различные масштабные задачи, такие как ориентации и навигация мобильных роботов, распознавание образов, а также работа с естественным языком, благодаря гибкости, адаптивности и самоорганизации процесса обучения в слабоструктурированных проблемных средах.

Система принятия решений для управления автономным роботом должна собирать данные с сенсоров робота, в частности с камер, навигационной системы и датчиков манипулятора. Схема работы подобной системы приведена на рис. 6. Все полученные сигналы с датчиков попадают в систему принятия решений. В ней, за репрезентацию сигналов из внешнего мира отвечают отдельные агенты-сенсоры. Например, данные с навигационной системы попадают на агентов сенсоры для показаний широты, долготы, углов поворота, азимута и т.д. Эти данные позволяют построить набор мультиагентных фактов, отвечающих за положение и направление движения робота, что в свою очередь позволит автоматически наполнять онтологию системы принятия решений. В результате интеллектуальной обработки этих данных строится модель текущего состояния системы «сад-робот», определяется целевая позиция и строится траектория достижения цели. Эти данные передаются на соответствующие агенты-эффекторы, которые отвечают за передачу

информации двигателям транспортной системы робота. При этом стоит отметить, что для интеллектуальной системы принятия решений внешними сенсорами являются и данные о карте местности или условиях работы (внешние источники данных), а также команды пользователя (садовода).

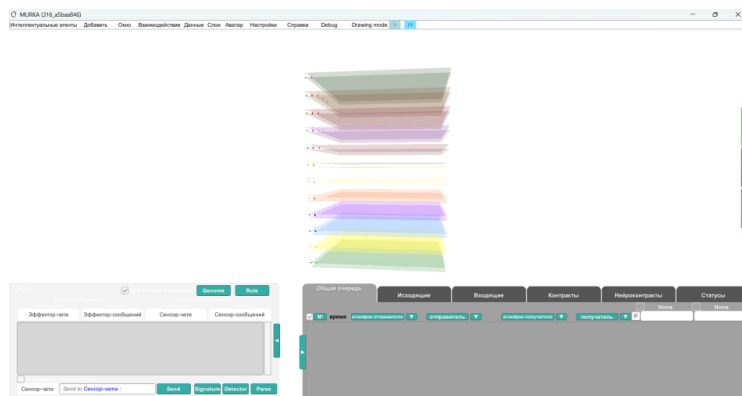


Рис. 5. Интерфейс мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры

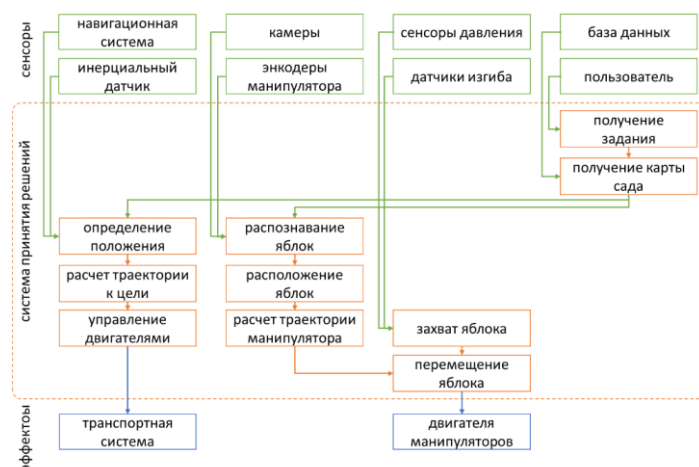


Рис. 6. Схема работы системы принятия решений робота для сбора урожая

Параллельно с задачей навигации и ориентации по территории сада стоит задача распознавания яблок, их состояния и расположения. Для этого используется поток данных с камер и энкодеров манипулятора. После определения яблока и расчета траектории манипулятора система переходит к отделению яблока от ветки. При этом постоянно отслеживаются расположение кисти и степень давления на яблоко. Эти данные позволяют передавать информацию на агенты-эффекторы, отвечающие за управление двигателями манипуляторов робота.

В статье [17, 18] представлена структура сенсорной подсистемы автономного робота, а также алгоритм формирования многозадачной системы локационных событий и отношений между объектами для построения метрических, топологических и семантических карт. В рамках исследования проблемы был разработан алгоритм обработки данных навигационной подсистемы мобильного робота на основе многозадачной нейрокогнитивной архитектуры. Благодаря этому создается гибридная карта местности и траектория движения робота в рамках системы принятия решений, что повышает автономность и эффективность работы в сложных условиях. Этот универсальный алгоритм будет использован в системе управления роботом для сбора урожая. На рис. 7 представлена схема алгоритма построения карты местности мультиагентной системой.

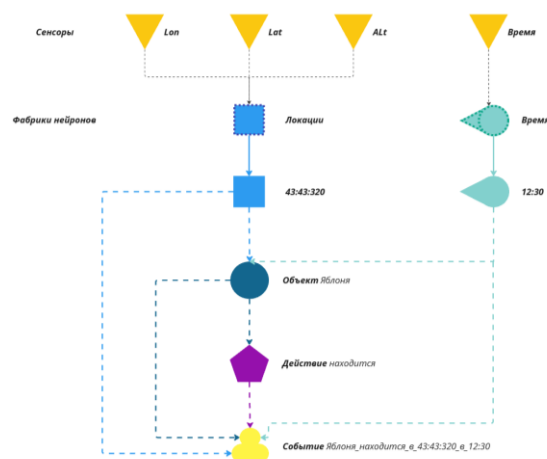


Рис. 7. Схема мультиагентной архитектуры для построения карты местности

В [19] рассматривается проблема повышения эффективности уборки плодовоовощной и ягодной продукции. Система управления манипулятором строится на основе мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры и представляет собой распределенную адаптивную обучающуюся систему в виде интеллектуального агента. В работе описан процесс обучения агента, включающий установку и отслеживание углов поворота сочленений пальцев схвата, контроль натяжения тросов и нагрузки двигателей с использованием данных сенсорной системы робота (рис. 8).

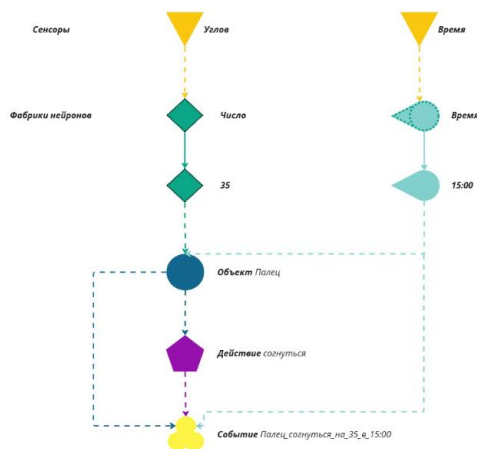


Рис. 8. Схема мультиагентной архитектуры для контроля угла пальца

В работе [20] представлена универсальная интеллектуальная система активной защиты растений, основанная на мультиагентной нейрокогнитивной архитектуре. Система включает подсистемы визуализации, перемещения, распознавания, принятия решений и управления манипуляторами. Особое внимание было уделено системе распознавания, которая анализирует изображения сельскохозяйственных культур для выявления заболеваний и вредителей, а также степень зрелости плодов. Используя мультиагентный подход, система сегментирует изображения на концепты (например, листья, плоды, гусеницы) и оценивает их состояние, формируя план действий для устранения угроз. Система демонстрирует потенциал для мониторинга и защиты сельскохозяйственных культур, но требует доработки для повышения точности и надежности. На рис. 9 представлен процесс фрагментации видеоизображения для дальнейшей обработки в мультиагентной системе распознавания объекта.

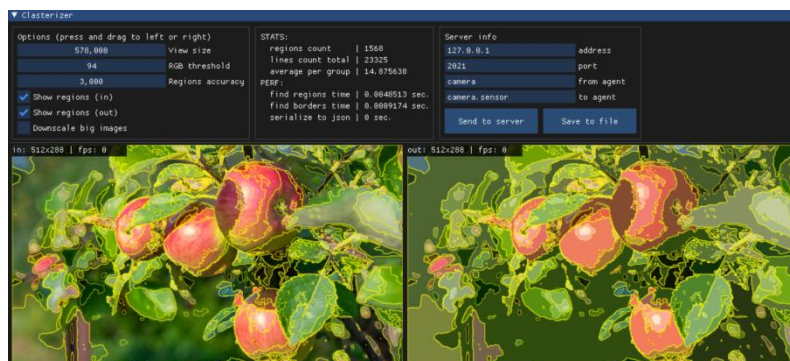


Рис. 9. Система распознавания образов интеллектуального агента

В дальнейшем планируется слияние отдельно разработанных интеллектуальных агентов в одну мультиагентную систему, формирующую общий искусственный интеллект, способный решать комплексные задачи в различных сферах деятельности, а также интеграция подобных систем в роботов любых назначений.

Заключение. В работе приведены результаты разработки программно-аппаратного комплекса для автоматизации сбора урожая. Прототип робота представляет собой модуль с двумя антропоморфными манипуляторами, реализующими все степени свободы руки человека. Манипулятор оснащен системой адометрии и матрицей сенсоров давления, что позволяет строить точную модель захватываемого манипулятором объекта. Для управления роботом используется система принятия решений на основе мультиагентных нейрокognитивных архитектур, которая на базе получаемых с сенсоров данных строит модель текущего состояния системы «робот-яблоко» и позволяет в автономном режиме управлять достаточно сложными манипуляторами для сбора урожая.

Подобный робот может позволить оптимизировать процесс сбора урожая в плодово-овощных садах и минимизировать потери урожая, связанные с человеческими факторами, такими как: несвоевременный сбор урожая, деформация плодов при сборе и т.д. В перспективе использование подобного робота позволит повысить урожайность, что крайне актуально в условиях необходимости обеспечения продовольственной безопасности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wysokiński M, Domagala J, Gromada A, Golonko M, Trębska P. Economic and energy efficiency of agriculture // *Agric. Econ.* – Czech. – 2020. – 66 (8). – P. 355-364. – DOI: 10.17221/170/2020-AGRICECON.
2. Wang F., Urquiza R.C., Roberts P. et al. Biologically inspired robotic perception-action for soft fruit harvesting in vertical growing environments // *Precision Agric.* – 2023. – 24. – P. 1072-1096. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10000-4>.
3. Shaikh T. A., Rasool T., Lone F. R. Towards leveraging the role of machine learning and artificial intelligence in precision agriculture and smart farming // *Computers and Electronics in Agriculture.* – 2022. – Vol. 198. – P. 107119. – ISSN 0168-1699. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107119>.
4. Бураева Е.В. Цифровизация сельского хозяйства как детерминанта экономического роста в аграрном секторе экономики // *Вестник ОрелГАУ.* – 2020. – № 2 (83).
5. Gupta N., Khosravy M., Patel N. et al. Economic data analytic AI technique on IoT edge devices for health monitoring of agriculture machines // *Appl. Intell.* – 2020. – 50. – P. 3990-4016. – <https://doi.org/10.1007/s10489-020-01744-x>.
6. Скворцов Е.А. Перспективы применения технологий искусственного интеллекта в сельском хозяйстве региона // *Экономика региона.* – 2020. – № 2.
7. Сологуб Н.Н., Уланова О.И., Остробородова Н.И., Остробородова Д.А. Проблемы и перспективы цифровых технологий в сельском хозяйстве // *МСХ.* – 2021. – № 4.
8. Li X., Zhang Y., Sorourkhah A. et al. Introducing Antifragility Analysis Algorithm for Assessing Digitalization Strategies of the Agricultural Economy in the Small Farming Section // *J. Knowl. Econ.* – 2024. – 15. – P. 12191-12215. – <https://doi.org/10.1007/s13132-023-01558-5>.
9. Антонов М.А., Анисимов А.А., Каширо С.Е. Об автоматизации сельского хозяйства // *Известия ТулГУ. Технические науки.* – 2022. – № 9.

10. Бадмаева М.Х. К вопросу об особенностях и проблемах применения систем искусственного интеллекта в сельском хозяйстве // Вестник БГУ. – 2022. – № 3.
11. El Jarroudi, M., Kouadio, L., Delfosse, P. et al. Leveraging edge artificial intelligence for sustainable agriculture // Nat Sustain. – 2024. – 7. – P. 846-854. – <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01352-4>.
12. Шутухин А.М., Калугина В.В. Развитие сельскохозяйственных бизнес-систем и применение технологических инноваций // ЕГИ. – 2021. – № 6 (38).
13. Федосов А.Ю., Меньших А.М., Фартуков В.А., Зборовская М.И., Васильев Д.М. Применение искусственного интеллекта при оптимизации орошения и применении гербицидов // Экономика строительства. – 2023. – № 2.
14. Liu S.Y. Artificial Intelligence (AI) in Agriculture // IT Professional. – 2020. – Vol. 22, No. 3. – P. 14-15. – DOI: 10.1109/MITP.2020.2986121.
15. Shaikh F.K., Memon M.A., Mahoto N.A., Zeadally S., Nebhen J. Artificial intelligence best practices in smart agriculture // IEEE Micro. – 2022. – Vol. 42, No. 1. – P. 17-24. – DOI: 10.1109/MM.2021.3121279.
16. Рыбаков А.В., Выборнов Н.А., Рыбаков И.А. Анализ методов компьютерного зрения, перспективных для применения в агропромышленном комплексе // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2022. – № 1 (57).
17. Бжыхатлов К.Ч., Пишенокова И.А., Макоев А.Р. Концепция создания системы управления мультиагентной робототехнической системой сельскохозяйственного назначения на базе нейрокогнитивных алгоритмов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 6-18. – DOI: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2024-3-6-18>.
18. Бжыхатлов К., Пишенокова И., Нагоева О., Мамбетов И. Мультиагентный алгоритм ориентации и навигации автономных роботов в горной местности // XV Международная научная конференция «INTERAGROMASH 2022» / под ред. А. Бескопыльного, М. Шамцяна, В. Артюха. INTERAGROMASH 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Т. 574. – Springer, Cham, 2023. – DOI: 10.1007/978-3-031-21432-5_204.
19. Нагоев З.В., Пишенокова И.А., Бжыхатлов К.Ч., Канкулов С.А. Имитационная модель интеллектуальной системы управления схватом сельскохозяйственного манипулятора на основе обучения мультиагентных нейрокогнитивных архитектур // Известия КБНЦ РАН. – 2021. – № 4 (102).
20. Бжыхатлов К.Ч., Пишенокова И.А., Канкулов С.А., Ксолов А.М. Концепция системы распознавания образов для интеллектуальной системы защиты растений // Цифровая трансформация науки и образования: Сб. научных трудов III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Нальчик, 09–14 июля 2022 года. – Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 2022. – С. 151-160. – EDN BQBKDM.

REFERENCES

1. Wysokiński M, Domagala J, Gromada A, Golonko M, Trębska P. Economic and energy efficiency of agriculture, *Agric. Econ. Czech*, 2020, 66 (8), pp. 355-364. DOI: 10.17221/170/2020-AGRIC ECON.
2. Wang F., Urquiza R.C., Roberts P. et al. Biologically inspired robotic perception-action for soft fruit harvesting in vertical growing environments, *Precision Agric*, 2023, 24, pp. 1072-1096. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10000-4>.
3. Shaikh T.A., Rasool T., Lone F.R. Towards leveraging the role of machine learning and artificial intelligence in precision agriculture and smart farming, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, Vol. 198, pp. 107119. ISSN 0168-1699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107119>.
4. Buraeva E.V. Tsifrovizatsiya sel'skogo khozyaystva kak determinanta ekonomicheskogo rosta v agrarnom sektore ekonomiki [Digitalization of agriculture as a determinant of economic growth in the agricultural sector of the economy], *Vestnik OrelGAU* [Bulletin of OrelSAU], 2020, No. 2 (83).
5. Gupta N., Khosravy M., Patel N. et al. Economic data analytic AI technique on IoT edge devices for health monitoring of agriculture machines, *Appl. Intell.*, 2020, 50, pp. 3990-4016. <https://doi.org/10.1007/s10489-020-01744-x>.
6. Skvortsov E.A. Perspektivy primeneniya tekhnologiy iskusstvennogo intellekta v sel'skom khozyaystve regiona [Prospects of application of artificial intelligence technologies in agriculture of the region], *Ekonomika regiona* [The Economy of the Region], 2020, No. 2.
7. Sologub N.N., Ulanova O.I., Ostroborodova N.I., Ostroborodova D.A. Problemy i perspektivy tsifrovyykh tekhnologiy v sel'skom khozyaystve [Problems and prospects of digital technologies in agriculture], *MSKh* [Ministry of Agriculture], 2021, No. 4.
8. Li X., Zhang Y., Sorourkhah A. et al. Introducing Antifragility Analysis Algorithm for Assessing Digitalization Strategies of the Agricultural Economy in the Small Farming Section, *J. Knowl. Econ.*, 2024, 15, pp. 12191-12215. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13132-023-01558-5>.
9. Antonov M.A., Anisimov A.A., Kashiro S.E. Ob avtomatizatsii sel'skogo khozyaystva [On automation of agriculture], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of TulSU. Technical sciences], 2022, No. 9.

10. Badmaeva M.Kh. K voprosu ob osobennostyakh i problemakh primeneniya sistem iskusstvennogo intellekta v sel'skom khozyaystve [To the question of features and problems of applying artificial intelligence systems in agriculture], *Vestnik BGU* [Bulletin of BSU], 2022, No. 3.
11. El Jarroudi, M., Kouadio, L., Delfosse, P. et al. Leveraging edge artificial intelligence for sustainable agriculture, *Nat Sustain*, 2024, 7, pp. 846-854. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01352-4>.
12. Shitukhin A.M., Kalugina V.V. Razvitie sel'skokhozyaystvennykh biznes-sistem i primeneniye tekhnologicheskikh innovatsiy [Development of agricultural business systems and application of technological innovations], *EGI* [EGI], 2021, No. 6 (38).
13. Fedosov A.Yu., Men'shikh A.M., Fartukov V.A., Zborovskaya M.I., Vasil'ev D.M. Primeneniye iskusstvennogo intellekta pri optimizatsii orosheniya i primeneniye gerbitsidov [The use of artificial intelligence in optimizing irrigation and the use of herbicides], *Ekonomika stroitel'stva* [Economics of Construction], 2023, No. 2.
14. Liu S.Y. Artificial Intelligence (AI) in Agriculture, *IT Professional*, 2020, Vol. 22, No. 3, pp. 14-15. DOI: 10.1109/MITP.2020.2986121.
15. Shaikh F.K., Memon M.A., Mahoto N.A., Zeadally S., Nebhen J. Artificial intelligence best practices in smart agriculture, *IEEE Micro*, 2022, Vol. 42, No. 1, pp. 17-24. DOI: 10.1109/MM.2021.3121279.
16. Rybakov A.V., Vybornov N.A., Rybakov I.A. Analiz metodov komp'yuternogo zreniya, perspektivnykh dlya primeneniya v agropromyshlennom komplekse [Analysis of promising computer methods for use in the agro-industrial complex], *Prikladnyy zhurnal: upravleniye i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2022, No. 1 (57).
17. Bzhikhatlov K.Ch., Pshenokova I.A., Makoev A.R. Kontseptsiya sozdaniya sistema upravleniya mul'tiagentnoy robototekhnicheskoy sistemoy sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya na baze neyrokognitivnykh algoritmov [The concept of creating a control system for a multi-agent robotic system for agricultural purposes based on neurocognitive algorithms], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 3, pp. 6-18. DOI: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2024-3-6-18>.
18. Bzhikhatlov K., Pshenokova I., Nagoeva O., Mambetov I. Mul'tiagentnyy algoritm orientatsii i navigatsii avtonomnykh robotov v gornoy mestnosti [Multi-agent algorithm for orientation and navigation of autonomous robots in mountainous areas], *XV Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «INTERAGROMASH 2022»* [XV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2022"], ed. by A. Beskopylnogo, M. Shamtsyana, V. Artyukha. *INTERAGROMASH 2022. Lecture Notes in Networks and Systems* [INTERAGROMASH 2022. Lecture Notes in Networks and Systems], Vol. 574. Springer, Cham, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-21432-5_204.
19. Nagoev Z.V., Pshenokova I.A., Bzhikhatlov K.Ch., Kankulov S.A. Imitatsionnaya model' intellektual'noy sistema upravleniya skhvatom sel'skokhozyaystvennogo manipulyatora na osnove obucheniya mul'tiagentnykh neyrokognitivnykh arkhitektur [An imitation model of an intelligent agricultural manipulator grip control system based on training multi-agent neurocognitive architectures], *Izvestiya KBNTS RAN* [Izvestiya KBSC RAS], 2021, No. 4 (102).
20. Bzhikhatlov K.Ch., Pshenokova I.A., Kankulov S.A., Ksalov A.M. Kontseptsiya sistema raspoznavaniya obrazov dlya intellektual'noy sistema zashchity rasteniy [The concept of an image recognition system for an intelligent plant protection system], *Tsifrovaya transformatsiya nauki i obrazovaniya: Sb. nauchnykh trudov III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Nal'chik, 09–14 iyulya 2022 goda* [Digital transformation of science and education: proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, Nalchik, July 09-14, 2022]. Nal'chik: Kabardino-Balkarskiy gosudarstvennyy universitet im. Kh.M. Berbekova, 2022, pp. 151-160. EDN BQBKDM.

Нагоев Залимхан Вячеславович – Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; e-mail: zaliman@mail.ru; 360000; г. Нальчик, Россия; тел.: 88662426562; к.т.н.

Загазежева Оксана Зауровна – Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; e-mail: oksmil82@mail.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: 89289136674; к.э.н.

Бжикхатлов Кантемир Чамалович – Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; e-mail: haosit13@gmail.com; г. Нальчик, Россия; тел.: 89631663448; к.ф.-м.н.

Мамбетов Идар Арсенович – Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; e-mail: idar.mam12@gmail.com; г. Нальчик, Россия; тел.: 89280846803; м.н.с.

Nagoev Zalikhan Vyacheslavovich – Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences"; e-mail: zaliman@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: +78662426562; cand. of eng. sc.

Zagazheva Oksana Zaurovna – Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences"; e-mail: oksmil.82@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: +79289136674; cand. of econ. sc.

Brzhikhatlov Kantemir Chamalovich – Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences"; e-mail: haosit13@gmail.com; Nalchik, Russia; phone: +79631663448; cand. of phys. and math. sc.

Mambetov Idar Arsenovich – Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences"; e-mail: idar.mam12@gmail.com; Nalchik, Russia; phone: +79280846803; junior researcher.

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-51-61

А.М. Корсаков, В.В. Иванова, А.А. Демчева, В.Д. Матвеев, Е.Ю. Смирнова

ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ СЦЕНАРИЯ РАБОТЫ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОМОРФНОГО МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ ЗАДАНИЕМ

Представлены результаты исследования возможности формирования и выполнения сценария работы мобильного робота с использованием нейроморфных информационно-управляющих элементов (логические элементы «И», «ИЛИ» и «НЕ»; нейроморфный экстраполятор; нейроморфный детектор нештатных ситуаций; нейроморфный механизм формирования условного рефлекса). Приведено краткое описание этих информационно-управляющих элементов. В качестве базового элемента при этом выступает сегментная спайковая модель нейрона CSNM с возможностью структурного обучения. Обученная модель CSNM способна решать задачу бинарной классификации, из чего следует возможность её использования в качестве отдельного информационно-управляющего элемента – детектора состояния. Организацию выполнения сценария работы мобильного робота предлагается строить на основе универсальных нейроморфных модулей с использованием указанных нейроморфных информационно-управляющих элементов. Предлагаемый механизм управления заданием сводится к следующему. Универсальным нейроморфным модулем, используемым в качестве блоков-переключателей, присваиваются приоритеты. Детектирование той или иной ситуации выполняется посредством универсального нейроморфного модуля, приоритет которого выше, что приводит к торможению всех универсальных нейроморфных модулей, приоритет которых ниже данного. Добавляя, либо удаляя универсальные нейроморфные модули, а также меняя их приоритетность, мы получаем требуемое для нас поведение мобильного робота. В работе приведены результаты исследования предложенного механизма организации сценария работы робота как на компьютерной модели, так и на реальном роботе. Для компьютерного моделирования был разработан специальный эмулятор, который позволил всесторонне исследовать предложенное решение. В качестве тестовой задачи было выбрано движение к цели в помещении с перегородками. Результаты экспериментов показали принципиальную применимость предложенного механизма формирования и выполнения сценария работы робота. В работе указаны основные недостатки текущей реализации: возможность ситуаций, приводящих к заикливанию набора действий, совершаемых мобильным роботом, а также необходимость ручного согласования основных параметров сцены и мобильного робота (метрические характеристики заданных размеров зон сцены, угловая и линейная скорость мобильного робота и т.п.). Предложены пути устранения указанных недостатков. Сделан вывод о перспективности применения сегментной спайковой модели нейрона и сетей на её основе для задач управления мобильными роботами.

Сценарий работы робота; нейроморфные системы; спайковые нейронные сети.

A.M. Korsakov, V.V. Ivanova, A.A. Demcheva, V.D. Matveev, E.Yu. Smirnova

ORGANIZING THE EXECUTION OF A MOBILE ROBOT OPERATION SCENARIO USING A NEUROMORPHIC TASK MANAGEMENT MECHANISM

The paper presents the results of a study of the possibility of forming and executing a mobile robot operation scenario using neuromorphic information and control elements (logical elements "AND", "OR" and "NOT"; neuromorphic extrapolator; neuromorphic emergency detector; neuromorphic conditioned reflex formation mechanism). A brief description of these information and control elements is given. In this case, the segmented spike model of the CSNM neuron with the possibility of structural learning acts as

a basic element. The trained CSNM model is capable of solving the binary classification problem, which implies the possibility of using it as a separate information control element – a state detector. It is proposed to organize the execution of the mobile robot operation scenario on the basis of universal neuromorphic modules using the specified neuromorphic information and control elements. The proposed task management mechanism boils down to the following. Universal neuromorphic modules used as switch blocks are prioritized. The detection of a particular situation is performed by means of a universal neuromorphic module, the priority of which is higher, which leads to the inhibition of all universal neuromorphic modules, the priority of which is lower than this one. By adding or removing universal neuromorphic modules, as well as changing their priority, we get the desired behavior of a mobile robot. The paper presents the results of a study of the proposed mechanism for organizing a robot operation scenario on both a computer model and a real robot. A special emulator was developed for computer modeling, which made it possible to comprehensively investigate the proposed solution. Moving towards the target in a room with partitions was chosen as a test task. The experimental results have shown the fundamental applicability of the proposed mechanism for forming and executing a robot operation scenario. The paper highlights the main disadvantages of the current implementation: the possibility of situations leading to looping of a set of actions performed by a mobile robot, as well as the need for manual coordination of the main parameters of the scene and the mobile robot (metric characteristics of the specified size of the scene zones, angular and linear velocity of the mobile robot, etc.). The ways to eliminate these disadvantages are proposed. The conclusion is made about the prospects of using the segmented spike model of a neuron and networks based on it for the tasks of controlling mobile robots.

Robot operation scenario; neuromorphic systems; spike neural networks.

Введение. Общим подходом к задаче планирования поведения и действий мобильного робота в сложной обстановке является использование иерархии миссия-сценарий-технологическая операция (ТОП). Под миссией понимается формализованное описание последовательности типовых сценариев. Сценарий описывает алгоритм решения функционально завершенной задачи и может быть представлен блок-схемой, в которой блоками действия являются типовые технологические операции (ТОП), соединенные блоками решения (переходателями). Уровень ТОП позволяет описать логику функционирования робота в процессе выполнения задания без излишней детализации и при планировании работ является неделимой (атомарной) сущностью. Такой подход обеспечивает формирование гибкого поведения робота, т.е. возможность реализации сколь угодно сложных комбинаций, при том, что отдельные элементы поведения представляют собой заранее отработанные процедуры.

Для наиболее сложных ситуаций целесообразно рассматривать поведенческие сценарии и поведенческие модели роботов. Поведенческий подход к управлению роботами был сформулирован в ряде классических работ [1–3] и в настоящее время является общепринятым, когда робот или небольшая группа роботов пытается решить нечетко поставленную задачу в слабо детерминированной среде [4–7].

Известны различные подходы к реализации вышеупомянутых блоков решения (переходателей) в составе алгоритма выполнения поведенческого сценария работы робота. Наиболее популярны и хорошо исследованы решения на базе методов нечеткой логики [8–11].

Эти методы позволяют формировать блоки решения с использованием лингвистических выражений, описывающих информацию об обстановке, характерную для работы в сложных средах (например, в мало изученной местности). Основным недостатком такого подхода является отсутствие фазы обучения и зависимость получаемых результатов от базы правил нечеткого вывода, формируемой на основании априорных экспертных оценок.

Также известны способы описания поведенческого сценария в виде марковской последовательности операций [12].

Для принятия решения применяется механизм марковского принятия решений, использующий постоянно пополняемую базу экспертных оценок вероятностных характеристик результатов локальных действий. Недостатком данного подхода, как и при использовании нечеткой логики, является зависимость результатов от априорных экспертных оценок.

В последние годы появляются публикации, описывающие различные комбинированные методы, дополненные обучением робота правильным реакциям на неожиданно возникающие обстоятельства [13–14].

В данной работе мы описываем использование нейроморфных информационно-управляющих элементов (НИУЭ) в качестве блоков-решателей при формировании сценария работы робота. НИУЭ подробно описаны в [15], здесь мы кратко перечислим основные аспекты этого решения.

К настоящему времени предложен ряд нейроморфных систем, основанных на импульсных (спайковых) нейронных сетях (SNN – Spiking Neuron Networks), включая HiAER, SpiNNaker, Neurogrid и TrueNorth [16–19]. Будучи основанными на механизме обработки данных на основе импульсов подобно тому, как это происходит в реальных биологических нейронных системах, SNN играют ключевую роль в нейроморфных вычислениях. Подход к нейроморфным вычислениям может поддерживать комплексное интеллектуальное управление, объединяя восприятие, обучение и принятие решений в режиме реального времени без указания и настройки большого количества гиперпараметров.

Перечислим предлагаемые [15] нейроморфные информационно-управляющие элементы.

Нейроморфный детектор состояния – это обученный нейрон CSNM (англ. Compartmental Spiking Neuron Model) способный решать задачу бинарной классификации [20]. Данная модель нейрона используется нами в качестве базового элемента.

Нейроморфные логические элементы. Важной особенностью используемой модели нейрона является возможность реализации на ней таких логических элементов, как «И» [21], «ИЛИ» [20] и «НЕ» [22], причём для реализации каждого из этих элементов необходим всего один нейрон CSNM. Для активации нейрона «И» необходим одновременный приход импульсов на все его входы (дендриты). Для активации нейрона «ИЛИ» достаточно прихода импульса на один (любой) из его входов. Нейрон «НЕ», благодаря синхронизирующему импульсу, сохраняет активность до тех пор, пока на тормозный вход его сомы не поступит инвертируемый импульс.

Нейроморфный механизм формирования условного рефлекса. В работе [21] авторами рассматривается схема формирования условного рефлекса, построенная на CSNM. В результате экспериментов было показано, что при одновременной подаче на входы схемы условного и безусловного раздражителей, через некоторое (определённое параметром) время, для вызова безусловной реакции становится достаточно подачи только условного раздражителя, что и означает завершение формирования условного рефлекса. Отметим, что схема позволяет воспроизводить условный рефлекс не только с положительным подкреплением, но и с отрицательным. Далее в настоящей работе будет использоваться формирование условно-рефлекторных реакций с отрицательным подкреплением.

Нейроморфный экстраполятор. В работе [22] авторами была предложена схема нейроморфного экстраполятора. Схема представляет собой структуру элементарной ячейки сети, на выходе которой формируется прогнозируемое значение входного сигнала в следующий момент времени. Элементы ячейки выполняют операции суммирования и вычитания по аналогии с биологическими нейронами. Преимущество такой модели экстраполятора состоит в простоте вычислений и реализации алгоритма. Прогнозируемые значения любых монотонно изменяющихся сигналов, поступающих на входы ячейки, вычисляются в реальном масштабе времени без перестройки связей между элементами. Значения сигналов вычитаются и суммируются с единичными коэффициентами, что не требует ни специфического обучения с внешним учителем, ни критериев для аппроксимации выхода к входному сигналу, ни восстановления описывающей его функции или функциональной зависимости.

Общая концепция нейроморфного механизма управления заданием при отработке сценария работы мобильного робота. Рассмотрим механизм формирования действий робота с использованием в качестве блоков-переключателей универсальных нейроморфных модулей. Структура такого модуля показана на рис. 1.

Для формирования универсальных нейроморфных модулей (УНМ) используются перечисленные выше НИУЭ.

Блок «CSNM – детектор ситуации» на рис. 1 соответствует НИУЭ «нейроморфный детектор состояния». Будучи предварительно обучен, он решает задачу бинарной классификации текущей *ситуации*. Примером такой ситуации может выступать приближение к препятствию.

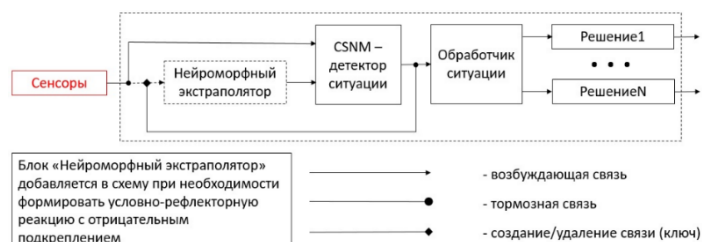


Рис. 1. Структура универсального нейроморфного модуля (УНМ) для формирования действий робота с использованием НИУЭ

Блок «Нейроморфный экстраполятор» соответствует НИУЭ «нейроморфный экстраполятор» и может заранее прогнозировать возникновение той или иной ситуации.

Блок «Обработчик ситуации», как и блок «Решение» реализуют логику функционирования робота верхнего уровня и могут быть реализованы как традиционными способами, так и с использованием НИУЭ.

Предлагаемый механизм управления заданием сводится к следующему. УНМ, используемым в качестве блоков-переключателей, присваиваются приоритеты. Детектирование той или иной ситуации выполняется посредством УНМ, приоритет которого выше, что приводит к торможению всех УНМ, приоритет которых ниже данного. Добавляя, либо удаляя УНМ, а также меняя их приоритетность, мы получаем требуемое для нас поведение мобильного робота.

Построение такой иерархии УНМ проиллюстрируем на примере, который мы будем использовать далее (рис. 2).

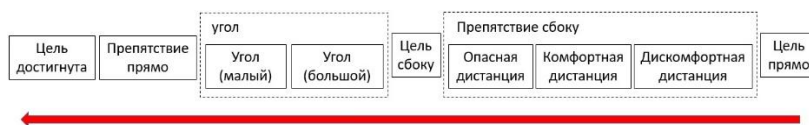


Рис. 2. Пример иерархии универсальных нейроморфных модулей

На рис. 2 отдельные блоки соответствуют различным УНМ, красная стрелка показывает возрастание их приоритета. Поведение мобильного робота, которое реализуется при помощи иерархии, приведённой на рис. 2, будет описано ниже.

Проведение экспериментов на компьютерной модели. Для апробации описанного выше механизма был реализован эмулятор на языке Python, позволивший задавать сцену (включая положение цели и стартовые положение и ориентацию мобильного робота), а также задавать необходимые параметры сцены и мобильного робота (линейную и угловую скорость и т.п.) (рис. 3). Задачей мобильного робота на данном этапе работы являлось движение к цели в помещении с перегородками.

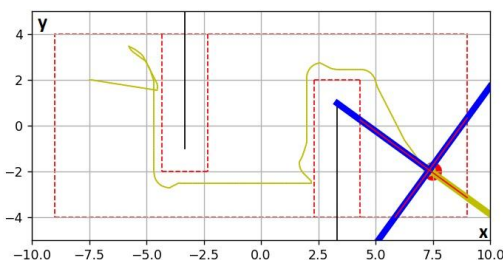


Рис. 3. Эмулятор для исследования механизма управления заданием

На рис. 3 чёрными линиями обозначены стены и перегородки рабочей сцены. В ходе экспериментов как с использованием эмулятора, так и с использованием реального мобильного робота, нами вводилось понятие «виртуальной стены». Под виртуальной стеной понимается воображаемая линия, проходящая на некотором (заданном параметром) рас-

стоянии от реальной стены или перегородки. Введение виртуальных стен обусловлено необходимостью предотвратить реальные столкновения мобильного робота с препятствиями. На рис. 3 виртуальные стены обозначены красными пунктирными линиями.

При экспериментах в эмуляторе, считалось, что мобильный робот способен измерять направление на цель, которая обозначена на рис. 3 красной окружностью.

Мобильный робот на рис. 3 обозначен, как общая начальная точка четырёх отрезков (трёх синих, и одного жёлтого). Необходимо отметить, что при экспериментах в эмуляторе мобильный робот рассматривался в качестве материальной точки, что считалось достаточным, для апробации метода. Сами отрезки отображают измеренное расстояние четырьмя установленными на мобильном роботе сенсорами – фронтальным (обозначен жёлтым цветом), левым, правым и задним (обозначены синим цветом) датчиками – до реальных стен и перегородок. Красная линия внутри каждого из указанных отрезков отображает расстояние до виртуальной стены. Последние расстояния и принимались в дальнейших расчётах за реально измеренные расстояния. Показания заднего датчика далее в расчётах не учитывались. Формулы расчёта направления на цель, реальных и виртуальных показаний датчиков, расстояний до виртуальных стен мы не приводим, т.к. они сводятся к элементарным геометрическим операциям.

Для проведения эксперимента в эмуляторе будем использовать иерархию УНМ, представленную на рис. 2. Приведём пошаговое описание поведения мобильного робота, которому соответствует такой набор и иерархия УНМ:

- 1) если цель достигнута, то безусловной реакцией робота является остановка;
- 2) если детектируется препятствие спереди, то в качестве безусловной реакции робота выбран поворот налево;
- 3) если детектируется малый угол (используя термины «большой» и «малый» угол, мы имеем в виду длину ребра угла, а не само его значение), то для правого угла безусловной реакцией является поворот налево, тогда как для левого угла – поворот направо;
- 4) если детектируется большой угол, то безусловной реакцией робота является движение прямо;
- 5) если детектируется цель справа при отсутствии препятствия справа, то безусловной реакцией робота является поворот направо; тогда как если детектируется цель слева при отсутствии препятствия слева, то безусловной реакцией робота является поворот налево;
- 6) если детектируется препятствие сбоку на опасной дистанции (слишком близко), то, в зависимости от результата обработки ситуации, робот либо движется прямо, либо поворачивает в сторону от препятствия;
- 7) если детектируется препятствие сбоку на комфортной дистанции, то, в зависимости от результата обработки ситуации, робот либо движется прямо, либо поворачивает в сторону от препятствия;
- 8) если детектируется препятствие сбоку на дискомфортной дистанции (слишком далеко), то, в зависимости от результата обработки ситуации, робот либо движется прямо, либо поворачивает в сторону препятствия;
- 9) если детектируется цель спереди, то безусловной реакцией робота является движение прямо.

Таким образом задание робота можно охарактеризовать, как «движение к цели на комфортном расстоянии от препятствий».

Теперь поясним работу нейроморфного обработчика ситуации (см. рис. 1) на примере пунктов 6-8 из списка, приведённого выше.

Важной особенностью обученной модели нейрона CSNM является её реакция на паттерны импульсов, в большей или меньшей степени отличные от паттерна импульсов, которому данная модель нейрона обучалась (обучающего примера) [20]. Модель нейрона CSNM способна отвечать на паттерны импульсов до некоторого предела отличные от обучающего примера (близкие обучающему тестовые примеры), однако, время ответа модели нейрона на близкие к обучающему тестовые примеры, отлично от времени ответа модели нейрона на обучающий пример. В первом случае это время оказывается больше, т.е. чем ближе входной паттерн импульсов к обучающему примеру, тем быстрее происходит генерация выходного импульса в модели нейрона.

Таким образом становится понятна идея нейроморфного обработчика ситуаций для данных примеров. Если нейрон-детектор ситуации обучить обучающему примеру, соответствующему одной из границ зон (опасная, комфортная, дискомфортная), то движение к этой границе зоны будет приводить к увеличению скорости ответа нейрона, а движение от неё – к уменьшению этой скорости. Именно это в данном случае и служит для нас критерием принятия того или иного решения.

Как видно из рис. 3, с началом работы робот движется в направлении цели пока не упирается в виртуальную стену. Дальнейшее поведение робота соответствует пунктам 1-9 набора и иерархии УНМ, приведённым выше. Отдельно отметим стремление робота держаться на «комфортном» для себя расстоянии от виртуальной стены. Как видно из рис. 3, в результате работы программы на данном примере, цель была достигнута.

Рассмотрим теперь пример, иллюстрирующий неудачную попытку достижения цели мобильным роботом (рис. 4,а).

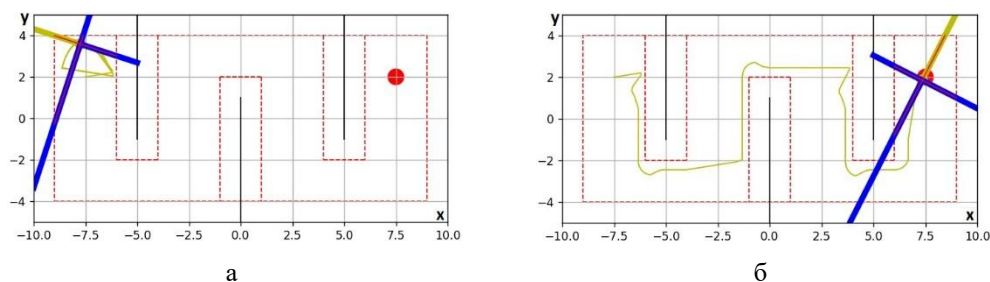


Рис. 4. Результат выполнения программы в эмуляторе:
а – цель не достигнута; б – цель достигнута

Неудача в достижении цели мобильным роботом, проиллюстрированная на рис. 4,а, обусловлена обработкой пункта 2 из набора и иерархии УНМ, приведённом в данном разделе выше. В соответствии с этим пунктом, при детекции препятствия спереди, в качестве безусловной реакции робота нами был выбран поворот налево. Этот выбор в данном случае приводит к заикливанию набора действий, совершаемых мобильным роботом. При этом безусловный поворот налево в качестве реакции на данную ситуацию был выбран нами случайным образом. Очевидно, что никаких объективных преимуществ перед безусловным поворотом направо у этого выбора нет. Однако, в данном конкретном примере, этот выбор сыграл важную роль. Действительно, при изменении безусловной реакции мобильного робота в данной ситуации на поворот направо, на той же сцене при тех же условиях цель достигается (рис. 4,б).

Таким образом, выбор действия в ситуации, подразумевающей несколько равноправных решений, является серьёзным недостатком предлагаемой авторами концепции. Решением данной проблемы могла бы стать фиксация попадания мобильного робота в режим заикливания набора действий и изменения действия в точке, подразумевающей несколько равноправных решений, на альтернативное. Однако в ходе выполнения настоящей работы авторы старались придерживаться, на сколько это возможно, нейроморфных решений, связанных с использованием модели нейрона CSNM. Поэтому в настоящее время ведётся работа над разработкой нейроморфной модели эпизодической (ситуационной) памяти в качестве нового НИУЭ. Предполагается, что такая модель сможет строить деревья принятия решений на уровне «ситуация n» – «набор возможных решений» – «действие» – «ситуация (n+1)» и т.д.

Укажем ещё на один недостаток предлагаемой концепции в текущей реализации. Как сама сцена, так и управляемый объект (мобильный робот), характеризуются некоторым набором параметров. Для мобильного робота это, в первую очередь, значения линейной и угловой скорости. Для сцены важными параметрами с точки зрения рассмотренного примера набора и иерархии УНМ являются геометрические характеристики вводимых зон: большой и малый угол; опасное, комфортное и дискомфортное расстояние до стены.

Представляется очевидным, что все эти параметры должны быть согласованы. Так рассогласование линейной и угловой скоростей мобильного робота приводит к случаям его заноса при поворотах (даже при использовании танкового поворота). Несогласованный выбор размеров зон, приводит к невозможности робота закрепиться на комфортном расстоянии от стены (рис. 5).

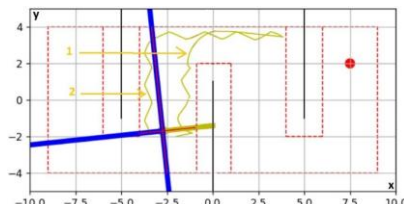


Рис. 5. Результат выполнения программы в эмуляторе. Наблюдаемые проблемы при рассогласовании параметров сцены и мобильного робота

На рис. 5 проиллюстрированы обе указанные выше проблемы. Цифрой «1» обозначен занос (отношение линейной скорости робота к угловой слишком велико). Цифра «2» указывает на ситуации невозможности стабилизировать своё движение на комфортном расстоянии от стены (рассогласованы параметры угловой скорости робота и ширины комфортной зоны).

В настоящее время эти параметры подбираются вручную (табл. 1), что является серьёзным недостатком с точки зрения адаптивности предлагаемого решения. Тем не менее, по мнению авторов, данная проблема может найти своё решение в рамках предложенной концепции. Так, набор действий может быть расширен за счёт таких решений, как «увеличить линейную скорость», «уменьшить угловую скорость» и т.п. Решение данной задачи станет следующим этапом развития настоящей работы.

Таблица 1

Использовавшиеся в экспериментах параметры сцены и мобильного робота

Параметр	Значение
Угловая скорость МР	9 ° / такт обработки
Линейная скорость МР	0,1 м / такт обработки
Ширина опасной зоны у стены	0,3 м
Ширина комфортной зоны у стены	0,3 м
Ширина дискомфортной зоны у стены	0,6 м
Ребро малого угла	1,2 м
Ребро большого угла	$1,2 \cdot \sqrt{2}$ м

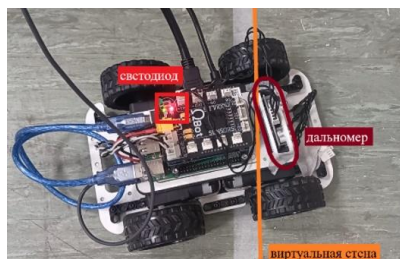
Проведение эксперимента на мобильном роботе. Эксперимент проводился с использованием робототехнической платформы «Omegabot» с программируемыми модулями. Робототехническая платформа включала в себя колёсную платформу, контроллер, микрокомпьютер RPi3, базовый блок, аккумуляторный блок и блок питания. Помимо этого, для проведения эксперимента использовались подключённые к базовой основе ультразвуковые дальномеры HC-SR04.

Как уже было указано, понятие цели при экспериментах на реальном мобильном роботе не вводилось из-за существующих на данный момент технических ограничений. В качестве потенциального решения для этой задачи можно предложить использование разработанного в ЦНИИ РТК гамма-пеленгатора для поиска источников ионизирующего излучения.

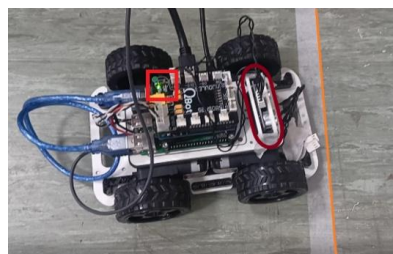
Исходя из этого эксперимент проводился в условиях ограничения функциональных возможностей системы навигации и ставил своей целью демонстрацию взаимодействия разработанных НИУЭ на примере обучения робота избегать фронтального столкновения с препятствием.

В ходе эксперимента робот совершал два подъезда к стене. С целью избежать реальных столкновений робота со стеной из всех показаний дальномера в ходе рассматриваемого эксперимента вычиталось фиксированное значение (20 см.). Таким образом в дальнейшем речь будет вестись о «виртуальной стене», но для краткости изложения слово «виртуальный» далее мы будем опускать.

В результате первого подъезда робот останавливался на линии стены (рис. 6,а). Загоревшийся красный светодиод сигнализирует о срабатывании НИУЭ «нейроморфный детектор состояния», в данном случае – о столкновении со стеной. Одновременно с этим, в результате отработки НИУЭ «формирование условного рефлекса», происходит формирование условно-рефлекторной реакции с отрицательным подкреплением.



а



б

Рис. 6. Два подъезда робота к стене: а – столкновение; б – остановка перед стеной

В результате второго подъезда к стене робот останавливается на расстоянии от стены 0,06 м (рис. 6,б). Величина этого расстояния зависит от частоты измерения дальности датчиком (в нашем случае – 2 Гц) и скорости робота. Как видно из рис. 6,б, при втором подъезде красный светодиод не загорается, что свидетельствует о том, что столкновения со стеной не произошло, а значит условно-рефлекторная реакция была сформирована.

Далее при возникновении подобных ситуаций мобильный робот будет выбирать действие, соответствующее ситуации, определённой как «препятствие спереди».

Заключение. На примере построения системы навигации для автономных мобильных роботов в работе предложена концепция организации выполнения сценария работы мобильного робота с использованием нейроморфного механизма управления заданием. Данная концепция подразумевает использование отдельных универсальных нейроморфных модулей. Набор и иерархия таких модулей и задают требуемое поведение объекта управления (мобильного робота). Сами универсальные нейроморфные модули предлагается строить на основе нейроморфных информационно-управляющих элементов, которые также были описаны в настоящей работе. В качестве базового элемента предложенных НИУЭ использовалась сегментная спайковая модель нейрона CSNM с возможностью структурного обучения.

В статье представлены результаты компьютерного моделирования в специально разработанном для этой цели эмуляторе. Кроме того, приведён результат натурных испытаний на мобильном роботе. Эксперименты показали принципиальную применимость предложенного подхода.

Среди основных недостатков на данном этапе разработки в работе отмечены возможность ситуаций, приводящих к заикливанию набора действий, совершаемых мобильным роботом, а также необходимость ручного согласования основных параметров сцены и мобильного робота (метрические характеристики заданных размеров зон сцены, угловая и линейная скорость мобильного робота и т.п.). В работе предложены пути решения выявленных проблем.

По мнению авторов, полученные результаты показывают потенциальную эффективность предложенного нейроморфного механизма управления заданием для мобильных роботов. Намечены пути продолжения этих исследований, направленные на устранение указанных в работе недостатков, а также дальнейшее усложнение моделей поведения, как на компьютерной модели, так и на реальных мобильных роботах.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России №075-00553-25-00 от 25.12.2024 «Исследование методов организации навигации роботов в сложных недетерминированных средах на базе теории когнитивного представления пространства» (FNRG-2025-0007 1024050200005-9-1.2.1;2.2.2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Brooks R. A robust layered control system for a mobile robot // *IEEE Journal on Robotics and Automation*. – 1986. – Vol. 2, No. 1. – P. 14-23.
2. Arkin R.C. Motor Schema – Based Mobile Robot Navigation // *The International Journal of Robotics Research*. – 1989. – Vol. 8, No. 4. – P. 92-112.
3. Brooks R.A. Intelligence without Reasoning // *Proc. of Intern. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI'91)*. – 1991. – Vol. 1. – P. 569-595.
4. De Silva L.N.C., Ekanayake H. Behavior-based robotics and the reactive paradigm a survey // *2008 11th International Conference on Computer and Information Technology*. – 2008. – P. 36-43.
5. Egerstedt M. Behavior Based Robotics Using Hybrid Automata // *International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control*. – 2000. – P. 103-116.
6. Chen H.L. et al. Behavior adaptation for mobile robots via semantic map compositions of constraint-based controllers // *Frontiers in Robotics and AI*. – 2023. – Vol. 10. – P. 917637.
7. Chetty R.M.K., Singaperumal M., Nagarajan T. Modeling and control of behavior based mobile robots – a design perspective // *Fifth International Conference on Precision, Meso, Micro and Nano Engineering*. – 2007. – P. 57-62.
8. Saffiotti A. Fuzzy Logic in Autonomous Robotics: behavior coordination // *Procs. of the 6th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*. – 1997. – P. 573-578.
9. Fatmi A. et al. A fuzzy logic based navigation of a mobile robot // *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. – 2008. – Vol. 2, No. 10. – P. 3569-3574.
10. Van Nguyen T.T., Phung M.D., Tran Q.V. Behavior-based navigation of mobile robot in unknown environments using fuzzy logic and multi-objective optimization // *arXiv preprint arXiv:1703.03161*. – 2017.
11. Seleka M.F. et al. Robot navigation in very cluttered environments by preference-based fuzzy behaviors // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2008. – Vol. 56, No. 3. – P. 231-246.
12. Lauri M., Hsu D., Pajarinen J. Partially observable markov decision processes in robotics: A survey // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2022. – Vol. 39, No. 1. – P. 21-40.
13. Alrooba R. et al. Markov decision process with deep reinforcement learning for robotics data offloading in cloud network // *Journal of Electronic Imaging*. – 2022. – Vol. 31, No. 6. – P. 061809-061809.
14. Saatchi R. Fuzzy Logic Concepts, Developments and Implementation // *Information*. – 2024. – Vol. 15, No. 10.
15. Иванова В.В., Демчева А.А., Корсаков А.М. Нейроморфный механизм управления заданием по результатам анализа ситуации // *Экстремальная робототехника*. – 2024. – Т. 35, № 1. – С. 308-3015.
16. Benjamin B.V. et al. Neurogrid: A Mixed-analog-digital multichip system for large-scale neural simulations // *Proc. IEEE*. – 2014. – Vol. 102, No. 5. – P. 699-716.
17. Merolla P.A. et al. A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface // *Science*. – 2014. – Vol. 345, No. 6197. – P. 668-673.
18. Painkras E. et al. SpiNNaker: A 1-W 18-core system-on-chip for massively-parallel neural network simulation // *IEEE J. Solid-State Circuits*. – 2013. – Vol. 48, No. 8. – P. 1943-1953.
19. Park J. et al. Hierarchical address-event routing architecture for reconfigurable large scale neuromorphic systems // *Proc. Int. Symp. Circuits Syst.* – 2012. – P. 707-711.
20. Корсаков А.М., Астапова Л.А., Бахшиев А.В. Применение сегментной спайковой модели нейрона со структурной адаптацией для решения задач классификации // *Информатика и автоматизация*. – 2022. – Т. 21, № 3. – С. 493-520.
21. Корсаков А.М., Бахшиев А.В., Астапова Л.А., Станкевич Л.А. Реализация поведенческих функций на спайковых нейронных сетях // *Информатика и автоматизация*. – 2021. – Т. 20, № 3. – С. 590-621.
22. Демчева А.А., Корсаков А.М., Фомин И.С. и др. Предупреждение возникновения критических ситуаций в сложных технических системах с использованием нейроморфного подхода // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2023. – Т. 11, № 4. – С. 281-291.

REFERENCES

1. Brooks R. A robust layered control system for a mobile robot, *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1986, Vol. 2, No. 1, pp. 14-23.
2. Arkin R.C. Motor Schema – Based Mobile Robot Navigation, *The International Journal of Robotics Research*, 1989, Vol. 8, No. 4, pp. 92-112.
3. Brooks R.A. Intelligence without Reasoning, *Proc. of Intern. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI'91)*, 1991, Vol. 1, pp. 569-595.
4. De Silva L.N.C., Ekanayake H. Behavior-based robotics and the reactive paradigm a survey, *2008 11th International Conference on Computer and Information Technology*, 2008, pp. 36-43.
5. Egerstedt M. Behavior Based Robotics Using Hybrid Automata, *International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control*, 2000, pp. 103-116.
6. Chen H.L. et al. Behavior adaptation for mobile robots via semantic map compositions of constraint-based controllers, *Frontiers in Robotics and AI*, 2023, Vol. 10, pp. 917637.

7. Chetty R.M.K., Singaperumal M., Nagarajan T. Modeling and control of behavior based mobile robots – a design perspective, *Fifth International Conference on Precision, Meso, Micro and Nano Engineering*, 2007, pp. 57-62.
8. Saffiotti A. Fuzzy Logic in Autonomous Robotics: behavior coordination, *Procs. of the 6th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, 1997, pp. 573-578.
9. Fatmi A. et al. A fuzzy logic based navigation of a mobile robot, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2008, Vol. 2, No. 10, pp. 3569-3574.
10. Van Nguyen T.T., Phung M.D., Tran Q.V. Behavior-based navigation of mobile robot in unknown environments using fuzzy logic and multi-objective optimization, *arXiv preprint arXiv:1703.03161*, 2017.
11. Selekw M.F. et al. Robot navigation in very cluttered environments by preference-based fuzzy behaviors, *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, Vol. 56, No. 3, pp. 231-246.
12. Lauri M., Hsu D., Pajarinen J. Partially observable markov decision processes in robotics: A survey, *IEEE Transactions on Robotics*, 2022, Vol. 39, No. 1, pp. 21-40.
13. Alrooba R. et al. Markov decision process with deep reinforcement learning for robotics data offloading in cloud network, *Journal of Electronic Imaging*, 2022, Vol. 31, No. 6, pp. 061809-061809.
14. Saatchi R. Fuzzy Logic Concepts, Developments and Implementation, *Information*, 2024, Vol. 15, No. 10.
15. Ivanova V.V., Demcheva A.A., Korsakov A.M. Neyromorfnyy mekhanizm upravleniya zadaniem po rezul'tatam analiza situatsii [Neuromorphic task management mechanism based on the results of the situation analysis], *Ekstremal'naya robototekhnika* [Extreme Robotics], 2024, Vol. 35, No. 1, pp. 308-3015.
16. Benjamin B.V. et al. Neurogrid: A Mixed-analog-digital multichip system for large-scale neural simulations, *Proc. IEEE*, 2014, Vol. 102, No. 5, pp. 699-716.
17. Merolla P.A. et al. A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface, *Science*, 2014, Vol. 345, No. 6197, pp. 668-673.
18. Painkras E. et al. SpiNNaker: A 1-W 18-core system-on-chip for massively-parallel neural network simulation, *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2013, Vol. 48, No. 8, pp. 1943-1953.
19. Park J. et al. Hierarchical address-event routing architecture for reconfigurable large scale neuromorphic systems, *Proc. Int. Symp. Circuits Syst.*, 2012, pp. 707-711.
20. Korsakov A.M., Astapova L.A., Bakhshiev A.V. Primenenie segmentnoy spaykovoy modeli neyrona so strukturnoy adaptatsiei dlya resheniya zadach klassifikatsii [Application of a compartmental spiking neuron model with structural adaptation for solving classification problems], *Informatika i avtomatizatsiya* [Informatics and Automation], 2022, Vol. 21, No. 3, pp. 493-520.
21. Korsakov A.M., Bakhshiev A.V., Astapova L.A., Stankevich L.A. Realizatsiya povedencheskikh funktsiy na spaykovykh neyronnykh setyakh [Behavioral functions implementation on spiking neural networks], *Informatika i avtomatizatsiya* [Informatics and Automation], 2021, Vol. 20, No. 3, pp. 590-621.
22. Demcheva A.A., Korsakov A.M., Fomin I.S. i dr. Preduprezhdenie vozniknoveniya kriticheskikh situatsiy v slozhnykh tekhnicheskikh sistemakh s ispol'zovaniem neyromorfnoy podkhoda [Prevention of emergency situations in complex technical systems using a neuromorphic approach], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2023, Vol. 11, No. 4, pp. 281-291.

Корсаков Антон Михайлович – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: a.korsakov@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125523351; с.н.с.

Иванова Виктория Владимировна – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: v.ivanova@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125523351; инженер.

Демчева Александра Андреевна – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: a.demcheva@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125523351; м.н.с.

Матвеев Виктор Дмитриевич – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: v.matveev@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125523351; инженер.

Смирнова Екатерина Юрьевна – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: eus@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125523351; зам. руководителя научно-исследовательского центра.

Korsakov Anton Mikhailovich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: a.korsakov@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125523351; senior researcher.

Ivanova Victoria Vladimirovna – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: v.ivanova@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125523351; engineer.

Demcheva Alexandra Andreevna – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: a.demcheva@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125523351; junior researcher.

Matveev Victor Dmitrievich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: v.matveev@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125523351; engineer.

Smirnova Ekaterina Yurievna – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: eus@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125523351; deputy head of scientific & research center.

УДК 681.5

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-61-68

А.А. Кочкаров, А.К. Куликов, В.А. Олхова, А.Н. Рыбак, А.С. Стахмич

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА РАННЕГО ОПОВЕЩЕНИЯ И МОНИТОРИНГА РАСТЕНИЙ

*Настоящее исследование направлено на систематизацию научных знаний о заболеваниях сельскохозяйственных культур с последующей интеграцией полученных данных в системы автоматизированного управления агропроизводством. Актуальность работы обусловлена необходимостью минимизации экономических потерь в растениеводстве за счёт ранней диагностики патологий и оптимизации фитосанитарного контроля. В рамках исследования проведена классификация заболеваний растений. В качестве модельного объекта выбрано растение базилик (*Ocimum basilicum* L.), характеризующееся высокой восприимчивостью к фитопатогенам в условиях интенсивного выращивания. Для создания инструмента автоматизированной диагностики осуществлён сбор специализированного датасета, включающего 214 изображений базилика на различных стадиях вегетации. Съёмка проводилась в контролируемых условиях с использованием RGB-камеры. Каждый образец аннотирован с локализацией повреждения, площади поражения. Особое внимание уделено методологическим аспектам формирования банков данных для биологических систем. Установлено, что ключевыми проблемами являются высокая вариабельность морфологических признаков у растений, влияние факторов окружающей среды на визуальное проявление заболеваний. На основе анализа полученных данных предложена архитектура системы раннего оповещения, включающая три модуля: Сенсорный блок – малогабаритные камеры и датчики микроклимата. Алгоритмический блок – нейросетевая модель для семантической сегментации изображений и алгоритмы оценки динамики развития патологий. Интерфейс принятия решений и оповещения – рекомендации по корректировке режимов полива, внесения пестицидов и микроэлементов. Обучение сверточной нейронной сети выполнено на основе фреймворка YOLOv11 с применением методов аугментации данных (гауссовский шум, аффинные преобразования) и трансферного обучения. Валидация модели на тестовой выборке показала точность детекции 74.7% (F1-score = 0.72). Для снижения ложноположительных срабатываний реализована постобработка предсказаний с учётом пространственно-временной корреляции данных. Разработанный прототип демонстрирует потенциал интеграции компьютерного зрения и агрономии для создания предиктивных систем управления. Дальнейшие исследования планируется направить на расширение датасета и увеличение измеряемых параметров, а также внедрение алгоритмов обработки данных на edge-устройствах для уменьшения задержек в принятии решений. Полученные результаты могут быть адаптированы для других культур закрытого грунта, что способствует развитию точного земледелия и снижению антропогенной нагрузки на агроэкосистемы.*

Система управления; автономные агропроизводства; раннее оповещение; компьютерное зрение; классификация; идентификация.

A.A. Kochkarov, A.K. Kulikov, V.A. Olhova, A.N. Ribak, A.S. Stachmich

AN INTELLIGENT PLANT MONITORING AND EARLY WARNING SYSTEM BASED

The present study is aimed at systematizing scientific knowledge about diseases of agricultural crops with the subsequent integration of the data obtained into automated agricultural production management systems. The relevance of the work is due to the need to minimize economic losses in crop production through early diagnosis of pathologies and optimization of phytosanitary control. As part of the

study, a classification of plant diseases was carried out. The basil plant (*Ocimum basilicum* L.), characterized by high susceptibility to phytopathogens under intensive cultivation conditions, was chosen as a model object. To create an automated diagnostic tool, a specialized dataset was collected, including 214 images of basil at various stages of vegetation. The shooting was carried out under controlled conditions using an RGB camera. Each sample is annotated with the localization of damage and the affected area. Special attention is paid to the methodological aspects of the formation of data banks for biological systems. It has been established that the key problems are the high variability of morphological features in plants, the influence of environmental factors on the visual manifestations of diseases. Based on the analysis of the data obtained, the architecture of the early warning system is proposed, which includes three modules: a sensor unit – small cameras and microclimate sensors. The algorithmic block is a neural network model for semantic image segmentation and algorithms for assessing the dynamics of pathology development. The decision – making and notification interface provides recommendations for adjusting irrigation regimes, applying pesticides and trace elements. The convolutional neural network is trained based on the YOLOv11 framework using data augmentation methods (Gaussian noise, affine transformations) and transfer learning. Validation of the model on the test sample showed a detection accuracy of 74.7% (F1-score = 0.72). To reduce false positives, postprocessing of predictions has been implemented, taking into account the spatial and temporal correlation of the data. The developed prototype demonstrates the potential of integrating computer vision and agronomy to create predictive control systems. Further research is planned to expand the dataset and increase parameters, as well as the introduction of data processing algorithms on edge devices to reduce delays in decision-making. The results obtained can be adapted for other indoor crops, which contributes to the development of precision agriculture and reduces anthropogenic stress on agroecosystems.

Management system; autonomous agricultural production; early warning; computer vision; classification; identification.

Введение. На сегодняшний день, активно развиваются сити-фермы закрытого грунта, аэропоника, гидропоника и увеличивается автономность агропроизводств. В связи с этим, остро стоит задача увеличения количества урожая с квадратного метра полезной площади сити-фермы. Данная задача может разделяться на под задачи мониторинга, а именно: область роста растения, качество удобрения, температура и влажность окружающей среды и защита растений от вредителей и болезней.

Существует несколько классификаций болезней растений: по симптомам болезни, по поражаемым растениям и по причинам вызывающих болезнь у растений. Так же можно классифицировать: по локализации болезни, по продолжительности заболевания, по способности поражать отдельные органы растений, по способности поражать растения в определенной фазе и по поражаемой биологической группе культур.

Удалось выяснить, что ключевую роль играет этиологическая (по причинам, вызывающим болезнь) классификация. Она делится на инфекционные и неинфекционные болезни.

Инфекционные болезни подразделяют на:

- ◆ Вирусные болезни растений.
- ◆ Бактериальные болезни растений или бактериозы.
- ◆ Грибные болезни растений или микофитозы.
- ◆ Актиномикозы – возбудители актиномицеты.
- ◆ Альгофитозы – возбудители паразитические водоросли.
- ◆ Антофитозы – возбудители паразитические и полупаразитические цветковые растения.

растения.

- ◆ Гельминтофитозы – возбудители паразитические нематоды.
- ◆ Энтомофитозы – возбудители паразитические насекомые.
- ◆ Арахнофитозы – возбудители паукообразные, в основном растительоядные клещи.

клещи.

Неинфекционные болезни подразделяются на:

- ◆ Нарушение питания – недостаток или избыток элементов минерального и органического питания.

- ◆ Нарушение климатических условий выращивания: водного режима, температурного режима, влажности воздуха, продолжительности фотопериода и освещенности.
- ◆ Химический токсикоз – вызывается высокими концентрациями различных химических веществ, в том числе пестицидов при их неграмотном использовании.
- ◆ Загрязнения воздуха – отравление ядовитыми примесями окружающего воздуха.
- ◆ Механические повреждения – повреждение корней и основания стебля при перевалке рассады или посадке растений на постоянное место, поддегивание растений, прижатых к шпалере, полегание растений.
- ◆ Тератоплазии – генетически наследуемые либо приобретенные нарушения.
- ◆ Болезни, вызываемые действием проникающих излучений – возникают при воздействии рентгеновских, космических лучей.

Одним из способов борьбы с данным списком болезней является ранее распознавание и извлечение очага болезни.

В рамках данного исследования распознавались болезни однолетней травы семейства Яснотковые базилика, а именно *O. basilicum* L. "Queen Sheba". Основная цель исследования заключается в определении факторов, влияющих на здоровье данной культуры, анализе существующих методов диагностики и классификации заболеваний, а также внедрении современных технологий машинного обучения для их автоматического распознавания. Основной тезис данной работы заключается в том, что методика классификации заболеваний базилика на основе изображений листьев с использованием нейросетей может повысить эффективность диагностики.

Определение факторов, влияющих на здоровье базилика. На основании изученных материалов выделены следующие параметры, влияющие на состояние базилика:

- ◆ Влажность почвы и воздуха – низкая влажность может приводить к усыханию листьев, а высокая способствует развитию грибковых инфекций;
- ◆ Температура окружающей среды – отклонения от оптимального температурного диапазона (18-25°C) могут ослаблять растение;
- ◆ Освещённость – недостаток света замедляет фотосинтез, а избыток может вызывать ожоги листьев;

Анализ текущих исследований. Как правило, исследования в данной области сосредоточены на анализе изображений с применением глубокого обучения. Кроме этого, были проанализированы ряд научных работ, посвященных методам обработки изображений и применению сверточных нейронных сетей (CNN) для диагностики заболеваний растений, включая базилик. Работа [1] представляет собой исследование, посвященное применению мобильных устройств для автоматизированного мониторинга заболеваний растений. Авторы рассматривают подходы к анализу изображений, полученных с камер мобильных телефонов, а также интеграцию этих методов в системы раннего выявления фитопатологий. Особое внимание уделено алгоритмам предобработки изображений, обнаружению признаков болезней и возможностям внедрения таких решений в сельскохозяйственную практику. Предложенная система распознавания болезней была протестирована на шести заболеваниях манго и показала точность более 80%. Аналитический обзор [2] методов применения сверточных нейросетей (CNN) для распознавания болезней растений. В статье подробно рассматриваются различные архитектуры CNN, такие как ResNet, AlexNet и VGG, их эффективность и особенности при обработке изображений сельскохозяйственных культур. В обзоре рассмотрены 121 статья за последние десять лет с различными подходами к обнаружению заболеваний, характеристиками наборов данных, исследуемыми культурами и патогенами. Результаты обзора позволяют понять, что на текущий момент модели идентификации заболеваний растений существуют не на уже давно известных датасетах, которые разработаны в рамках международных грантов исследования по которым проводились 5 лет назад. Стоит заметить, что системы не работают над решением задачи раннего оповещения, а так же нет системы мобильной системы фотодетекции для быстрого сбора информации и оформления его в базу данных для последующих исследований. Анализ источников [3–5] показал, что методы машинного обуче-

ния, особенно свёрточные нейронные сети, являются эффективными инструментами для автоматической классификации и диагностики заболеваний на основе изображений. Применение подобных подходов к диагностике болезней базилика может значительно повысить точность и скорость выявления патологий, что способствует своевременному принятию мер по лечению и предотвращению распространения заболеваний. В рамках проведения обзора исследований по классификации и детекции заболеваний базилика с помощью нейросетевых моделей найдено не было, так как открытых банков данных для решения данной задачи найдено не было.

Идентификация заболевания. Первым этапом был собран датасет изображений базилика, включающий фотографии базилика в процессе вегетации с различными заболеваниями. Данные были получены в рамках опыта лаборатории Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук».

Параметры опыта, которые включали:

- ♦ Виды и сорта: *Ocimum × citriodorum* Vis. "Каприз", *O. basilicum* L. "Queen Sheba", *O. basilicum* L. "Сиамская королева".

- ♦ Освещение:

- Синий (450 нм) – интенсивность 50%;
- Белый (полный спектр) – 80%;
- Красный (660 нм) – 0%;
- Дальний красный (700–800 нм) – 25%.

- ♦ Фотопериод: 8:00 – 22:00 (14 ч. свет / 10 ч. темнота).

- ♦ Плотность фотосинтетически активного потока фотонов: 270–280 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.

- ♦ Температурный режим: 24–26°C.

Для сбора изображений на рис. 1. был разработан программно-аппаратный комплекс на основе одноплатного компьютера Raspberry Pi 5 и двух камер вебкамер Logitech C922 Pro Stream на рис. 2. В лаборатории есть датчики и системы контроля температуры и влажности, а также производится контроль времени и спектра освещенности.

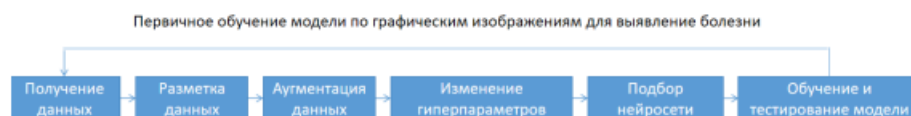


Рис. 1. Процесс сбора и обучения нейронной сети для решения задачи идентификации заболеваний растения

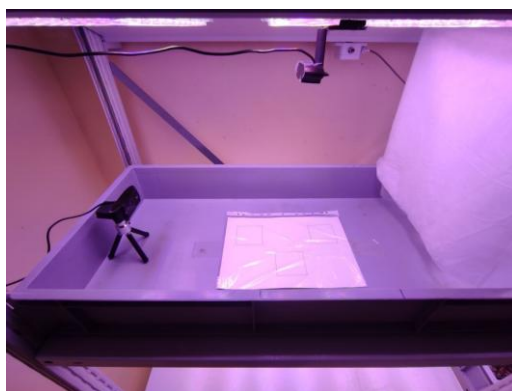


Рис. 2. Часть программно-аппаратного комплекса для фотофиксации вегетации растений, с целью формирования банка данных

Следует подчеркнуть, что разметка проводилась вручную, после чего изображения были использованы для обучения и тестирования модели. Аугментация данных проводилась с помощью следующих методов: добавления шумов, поворот изображений, изменения фокусировки, изменения цветовой схемы. Идентификация заболеваний проводилась с использованием YOLO v11, обученной на платформе Roboflow.

- ♦ Разделение данных – выделение обучающей, валидационной и тестовой выборок (80%-20%-20%).
- ♦ Обучение модели – использование предварительно обученных весов и дообучение на размеченных изображениях базилика.
- ♦ Оценка качества – метрики точности (Accuracy, Precision, Recall).
- ♦ Количество эпох – 300.

Обобщая полученные результаты, следует отметить, что точность модели на тестовой выборке на рис. 3. составила 74.7%, полнота 69,3% , что свидетельствует о высокой эффективности нейросетевого подхода. В то же время анализ графиков обучения показал стабильную сходимость без признаков переобучения.



Рис. 3. Результат обучения нейронной сети для идентификации болезни на листьях базилика

По результатам, работы над исследованием было принято решения формирования технического облика на рис. 4. системы раннего оповещения о заболевании растений. В рамках исследования и работы над литературу стало понятно, что растения при болезнях и поражениях изменяется в темпероста, стеблей и листьев, что можно определить с помощью морфологического анализа. Также, растение прямо сигнализирует о поражении за счет изменения цветности или формы листа, что можно идентифицировать с помощью полученной нейронной сети.

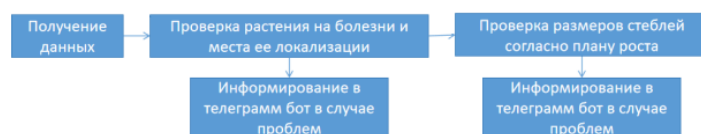


Рис. 4. Технический облик системы раннего оповещения о заболевании растения

Закключение. Проведённое исследование демонстрирует значительный потенциал применения методов компьютерного зрения и глубокого обучения для решения актуальных задач агрономии, связанных с ранней диагностикой заболеваний растений. В рамках работы подтверждена эффективность использования нейронных сетей для идентификации патологий базилика (*Ocimum basilicum* L.), а также предложены практические решения по интеграции данных технологий в системы автономного агропроизводства.

Таким образом, в ходе исследования были достигнуты следующие результаты:

- ♦ Разработана и обучена модель YOLO v11 для классификации заболеваний базилика. Архитектура модели, основанная на принципах одноэтапного детектирования объектов, обеспечила высокую точность распознавания. при обработке изображений листьев

с различными типами поражений, включали фузариоз и бактериальную пятнистость. Обучение проводилось на датасете, включающем 214 аннотированных изображений, с применением аугментации данных для повышения устойчивости модели к вариациям освещения и угла съёмки.

♦ Определены ключевые факторы, влияющие на эффективность диагностики и выращивания базилика. Качество исходных данных – разрешение изображений не менее 1280×720 пикселей и равномерная подсветка при съёмке. Микроклиматические параметры – поддержание температуры в диапазоне 22–26°C и влажности 60–70%. Своевременность обработки данных – задержка в диагностике свыше 48 часов снижает эффективность лечения на 35%.

♦ Предложен технический облик системы раннего оповещения о заболевании растения. Технический облик состоит из подмодулей морфологического анализа и детекции заболеваний, что позволит оповещать об отклонениях от нормы вегетации на ранних стадиях.

Реализация предложенных решений в агропромышленных комплексах позволит минимизировать потери урожая, повысить рентабельность производства и сократить использование пестицидов за счёт превентивного подхода к защите растений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Anantrasirichai N., Hannuna S., Canagarajah N.* Towards automated mobile-phone-based plant pathology management // arXiv preprint arXiv:1912.09239. – 2019.
2. *Abade A., Ferreira P. A., de Barros Vidal F.* Plant diseases recognition on images using convolutional neural networks: A systematic review // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2021. – Vol. 185. – P. 106125.
3. *Козаренко В.А.* Методы распознавания медицинских изображений в задачах компьютерной диагностики // Электронная библиотека Гомельского государственного университета. – URL: https://elib.gsu.by/bitstream/123456789/11756/1/Kozar_Recognition_methods_for_medical.pdf.
4. *Смирнов А.В., Иванова Е.П.* Эффективность свёрточных нейронных сетей различной архитектуры для задачи диагностики депрессии по данным ЭЭГ // *Известия Саратовского университета*. – 2023. – URL: <https://andjournal.sgu.ru/ru/articles/effektivnost-svertochnyh-neyronnyh-setey-razlichnoy-arhitektury-dlya-zadachi-diagnostics>.
5. *Петров К.С., Орлов А.Д.* Разработка автоматизированных алгоритмов компьютерного зрения для обработки медицинских изображений // *КиберЛенинка*. – 2022. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-avtomatizirovannyh-algoritmov-kompyuternogo-zreniya-dlya-obrabotki-meditsinskih-izobrazheniy>.
6. *Luo M. and Rhodes P.* A study of digital camera colorimetric characterisation based on polynomial modeling // *Color Research and Application*. – 2001. – 26. – P. 76-84.
7. *Hannuna S., Kunkel T., Anantrasirichai N., Canagarajah N.* Colour Correction for Assessing Plant Pathology Using Low Quality Cameras // *Proceedings of the International Conference on Bioinformatics Models, Methods and Algorithms*. – 2011. – P. 326-331.
8. *Wang Z., Chi Z. and Feng D.* Shape based leaf image retrieval // *IEE Proc of Vision, Image and Signal Processing*. – 2003. – 150. – P. 34-43.
9. *Anantrasirichai N., Hannuna Sion, Canagarajah Nishan.* Automatic Leaf Extraction from Outdoor Images // arXiv:1709.06437.
10. *Архинов А.Г., Косогол С.Н., Моторин О.А., Горбачев М.И., Суворов Г.А., Труфляк Е.В.* Цифровая трансформация сельского хозяйства России. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. – 80 с.
11. *Zhukov A.O., Kulikov A.K., Kartsan I.N.* Optimization of the control algorithm for heterogeneous robotic agricultural monitoring tools // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 839, Innovative Development of Agrarian-and-Food Technologies. – 2021. – Sci. 839 032039. – DOI: 10.1088/1755-1315/839/3/032039.
12. *Жуков А.О., Куликов А.К., Суровцева Е.К.* Разработка алгоритма распределения задач в группе гетерогенных робототехнических средств на основе экономических механизмов // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2018. – <https://doi.org/10.31776/RTCJ.6405>.
13. *Rumiantsev B., Dzhathoeva S., Sadykhov E., Kochkarov A.* A Model for the Determination of Potato Tuber Mass by the Measurement of Carbon Dioxide Concentration // *Plants*. – 2023. – 12, 2962. – <https://doi.org/10.3390/plants12162962>.
14. *Rumiantsev B., Dzhathoeva S., Zotov V., Kochkarov A.* Analysis of the Potato Vegetation Stages Based on the Dynamics of Water Consumption in the Closed Urban Vertical Farm with Automated Microclimate Control // *Agronomy*. – 2023. – 13, 954. – <https://doi.org/10.3390/agronomy13040954>.

15. Rumiantsev B.V., Kochkarov R.A., Kochkarov A.A. Graph-Clustering Method for Construction of the Optimal Movement Trajectory under the Terrain Patrolling // *Mathematics*. – 2023. – 11, 223. – <https://doi.org/10.3390/math11010223>.
16. Кочкаров А.А., Куликов А.К., Румянцев Б.В. Опыт применения и перспективы использования искусственного интеллекта в области агробиотехнологий // *Горизонты математического моделирования и теория самоорганизации. К 95-летию со дня рождения С.П. Курдюмова*. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2024. – С. 144-153. – <https://doi.org/10.20948/k95-8>.
17. Altieri M. *Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture*. CRC Press, Endereço. – 2nd ed. February 2018.
18. Sharada P. Mohanty, David P. Hughes, and Marcel Salathé. Using deep learning for image-based plant disease detection // *Frontiers in Plant Science*. – 2016. – 7:1419.
19. Sally A. Miller, Fen D. Beed, and Carrie Lapaire Harmon. Plant Disease Diagnostic Capabilities and Networks // *Annual Review of Phytopathology*. – Sep 2009. – 47 (1). – P. 15-38.
20. Anne-Katrin Mahlein. Plant disease detection by imaging sensors – parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping // *Plant Disease*. – 2016. – 100 (2). – P. 241-251.

REFERENCES

1. Anantrasirichai N., Hannuna S., Canagarajah N. Towards automated mobile-phone-based plant pathology management, *arXiv preprint arXiv:1912.09239*, 2019.
2. Abade A., Ferreira P. A., de Barros Vidal F. Plant diseases recognition on images using convolutional neural networks: A systematic review, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, Vol. 185, pp. 106125.
3. Kozarenko V.A. Metody raspoznavaniya meditsinskih izobrazheniy v zadachakh komp'yuternoy diagnostiki [Methods of medical image recognition in computer diagnostics tasks], *Elektronnaya biblioteka Gomel'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Electronic Library of Gomel State University]. Available at: https://elib.gsu.by/bitstream/123456789/11756/1/Kozar_Recognition_methods_for_medical.pdf.
4. Smirnov A.V., Ivanova E.P. Effektivnost' svertochnykh neyronnykh setey razlichnoy arkhitektury dlya zadachi diagnostiki depressii po dannym EEG [The effectiveness of convolutional neural networks of various architectures for the task of diagnosing depression according to EEG data], *Izvestiya Saratovskogo universiteta* [Proceedings of the Saratov University], 2023. Available at: <https://andjournal.sgu.ru/ru/articles/effektivnost-svertochnykh-neyronnykh-setey-razlichnoy-arhitektury-dlya-zadachi-diagnostiki>.
5. Petrov K.S., Orlov A.D. Razrabotka avtomatizirovannykh algoritmov komp'yuternogo zreniya dlya obrabotki meditsinskih izobrazheniy [Development of automated computer vision algorithms for medical image processing], *KiberLeninka* [CyberLeninka], 2022. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-avtomatizirovannykh-algoritmov-kompyuternogo-zreniya-dlya-obrabotki-meditsinskih-izobrazheniy>.
6. Luo M. and Rhodes P. A study of digital camera colorimetric characterisation based on polynomial modeling, *Color Research and Application*, 2001, 26, pp. 76-84.
7. Hannuna S., Kunkel T., Anantrasirichai N., Canagarajah N. Colour Correction for Assessing Plant Pathology Using Low Quality Cameras, *Proceedings of the International Conference on Bioinformatics Models, Methods and Algorithms*, 2011, pp. 326-331.
8. Wang Z., Chi Z. and Feng D. Shape based leaf image retrieval, *IEE Proc of Vision, Image and Signal Processing*, 2003, 150, pp. 34-43.
9. Anantrasirichai N., Hannuna Sion, Canagarajah Nishan. Automatic Leaf Extraction from Outdoor Images, *arXiv:1709.06437*.
10. Arkhipov A.G., Kosogor S.N., Motorin O.A., Gorbachev M.I., Suvorov G.A., Truflyak E.V. Tsifrovaya transformatsiya sel'skogo khozyaystva Rossii [Digital transformation of agriculture in Russia]. Moscow: FGBNU «Rosinformagrotekh», 2019, 80 p.
11. Zhukov A.O., Kulikov A.K., Kartsan I.N. Optimization of the control algorithm for heterogeneous robotic agricultural monitoring tools, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 839, *Innovative Development of Agrarian-and-Food Technologies*, 2021. Sci. 839 032039. DOI: 10.1088/1755-1315/839/3/032039.
12. Zhukov A.O., Kulikov A.K., Surovtseva E.K. Razrabotka algoritma raspredeleniya zadach v gruppe geterogennykh robototekhnicheskikh sredstv na osnove ekonomicheskikh mekhanizmov [Development of an algorithm for distributing tasks in a group of heterogeneous robotic tools based on economic mechanisms], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2018. Available at: <https://doi.org/10.31776/RTCJ.6405>.
13. Rumiantsev B., Dzhatdoeva S., Sadykhov E., Kochkarov A. A Model for the Determination of Potato Tuber Mass by the Measurement of Carbon Dioxide Concentration, *Plants*, 2023, 12, 2962. Available at: <https://doi.org/10.3390/plants12162962>.

14. Rumiantsev B., Dzhathoeva S., Zotov V., Kochkarov A. Analysis of the Potato Vegetation Stages Based on the Dynamics of Water Consumption in the Closed Urban Vertical Farm with Automated Microclimate Control, *Agronomy*, 2023, 13, 954. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy13040954>.
15. Rumiantsev B.V., Kochkarov R.A., Kochkarov A.A. Graph-Clustering Method for Construction of the Optimal Movement Trajectory under the Terrain Patrolling, *Mathematics*, 2023, 11, 223. Available at: <https://doi.org/10.3390/math11010223>.
16. Kochkarov A.A., Kulikov A.K., Rumyantsev B.V. Opyt primeneniya i perspektivy ispol'zovaniya iskusstvennogo intellekta v oblasti agrobiotekhnologii [Experience of using state intelligence in industry. Microbiological], *Gorizonty matematicheskogo modelirovaniya i teoriya samoorganizatsii. K 95-letiyu so dnya rozhdeniya S.P. Kurdyumova* [Horizons of mathematical modeling and theory of self-organization. On the 95th anniversary of S.P. Kurdyumov's birth]. Moscow: IPM im. M.V. Keldysha, 2024, pp. 144-153. Available at: <https://doi.org/10.20948/k95-8>.
17. Altieri M. *Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture*. CRC Press, Endereço. 2nd ed. February 2018.
18. Sharada P. Mohanty, David P. Hughes, and Marcel Salathé. Using deep learning for image-based plant disease detection, *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7:1419.
19. Sally A. Miller, Fen D. Beed, and Carrie Lapaire Harmon. Plant Disease Diagnostic Capabilities and Networks, *Annual Review of Phytopathology*, Sep 2009, 47 (1), pp. 15-38.
20. Anne-Katrin Mahlein. Plant disease detection by imaging sensors – parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping, *Plant Disease*, 2016, 100 (2), pp. 241-251.

Кочкаров Азрет Ахматович – ФИЦ «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН; e-mail: akochkar@fbras.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74956603430 (доб. 499); зам. директора по инновационной работе; к.ф.-м.н.; д.т.н.; профессор.

Куликов Андрей Кириллович – МИРЭА – Российский технологический университет; e-mail: kulikov_a@mirea.ru; г. Москва, Россия; тел: +74996008080; к.т.н.; доцент.

Ольхова Варвара Алексеевна – Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации; e-mail: 237561@edu.fa.ru; г. Москва, Россия; тел: 89267888554; студент.

Стахмич Александр Сергеевич – Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации; e-mail: 220807@edu.fa.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89853006560; студент.

Рыбак Артем Николаевич – Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации; e-mail: 223415@edu.fa.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89104834217; студент.

Kochkarov Azret Akhmatovich – Federal Research Center for Fundamental Principles of Biotechnology of the RAS; e-mail: akochkar@fbras.ru; Moscow, Russia; phone: +74956603430 (ext. 499); deputy director for Innovation; cand. of phys. and math. sc.; dr. of eng. sc.; professor.

Kulikov Andrey Kirillovich – MIREA – Russian Technological University; e-mail: kulikov_a@mirea.ru; Moscow, Russia; phone: +74996008080; cand. of eng. sc.; associate professor.

Olkhova Varvara Alekseevna – Financial University under the Government of the Russian Federation; e-mail: 237561@edu.fa.ru; Moscow, Russia; phone: +79267888554; student.

Stakhmich Aleksander Sergeevich – Financial University under the Government of the Russian Federation; e-mail: 220807@edu.fa.ru; Moscow, Russia; phone: +79853006560; student.

Rybak Artem Nikolaevich – Financial University under the Government of the Russian Federation; e-mail: 223415@edu.fa.ru; Moscow, Russia; phone: +79104834217; student.

УДК 007.52+004.896: 656.052.48: 519.876.5

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-68-82

М.И. Бесхмельнов, Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ КОНФИГУРАЦИИ МАРШРУТА НА КАРТЕ МЕСТНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЧАСТИЧНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Описывается гибридный алгоритм ситуационного планирования траектории в условиях частичной неопределенности для двумерного пространства, основанный на интеграции волнового и муравьиного алгоритмов, позволяющий строить в реальном масштабе времени траектории минимальной длины с одновременной оптимизацией ряда других критериев качества построенно-

го пути. Процессы формирования участка траектории и перемещения по нему объекта чередуются на каждом шаге. Формирование траектории осуществляется последовательно (пошагово) на двух уровнях каждого шага. Формирование и ориентация локальной зоны видимости и покрываемого ею региона на карте местности выполняется относительно текущего опорного вектора. Процедурами первого уровня на карте местности последовательно по шагам формируется цепочка попарно смежных регионов с локализованными препятствиями. Процедурами второго уровня на шаге формируется множество траекторий прохода подвижного объекта через регион. При слиянии цепочки регионов образуется область местности, через которую прокладывается траектория. Вся траектория является совокупностью отдельных траекторий прохода подвижного объекта через регионы, связывающих его исходную позицию с целевой позицией. Поиск решения осуществляется популяцией агентов на графе поиска решений. Вершины множества соответствуют ячейкам области. Две вершины связаны ребром, если соответствующие им ячейки на модели местности в виде дискретного рабочего поля смежны и возможен переход соединения из одной ячейки в другую. Синтез траектории и передвижение подвижного объекта в условиях неопределенности – это сложная задача, требующая интеграции различных сенсорных систем, алгоритмов обработки данных, алгоритмов планирования пути и систем управления движением. Постоянное развитие технологий в областях искусственного интеллекта, машинного зрения и робототехники позволяет создавать всё более совершенные системы автономной навигации. Однако, полная автономность и гарантированная безопасность подвижного объекта в любых условиях пока остаются сложными задачами для исследования.

Траектория; алгоритм; ситуационное планирование; частичная неопределенность; локальная зона видимости; подвижный объект.

M.I. Beskhamelnov, B.K. Lebedev, O.B. Lebedev

HYBRID METHOD OF ROUTE CONFIGURATION PLANNING ON A TERRAIN MAP UNDER CONDITIONS OF PARTIAL UNCERTAINTY

The paper describes a hybrid algorithm for situational trajectory planning under partial uncertainty for a two-dimensional space based on the integration of the wave and ant algorithms, which allows constructing trajectories of minimum length in real time with simultaneous optimization of a number of other quality criteria for the constructed path. The processes of forming a trajectory section and moving an object along it alternate at each step. The trajectory is formed sequentially (step by step) at two levels of each step. The local visibility zone and the region covered by it on the terrain map are formed and oriented relative to the current reference vector. The first-level procedures sequentially form a chain of pairwise adjacent regions with localized obstacles on the terrain map in steps. The second-level procedures form a set of trajectories for the passage of a moving object through a region at a step. When the chain of regions merges, a terrain region is formed through which the trajectory is laid. The entire trajectory is a set of individual trajectories for the passage of a moving object through regions connecting its initial position with the target position. The search for a solution is carried out by a population of agents on a solution search graph. The vertices of the set correspond to the cells of the region. Two vertices are connected by an edge if the corresponding cells on the terrain model in the form of a discrete working field are adjacent and the transition of the connection from one cell to another is possible. It should be noted that the synthesis of the trajectory and the movement of a moving object under uncertainty is a complex task that requires the integration of various sensor systems, data processing algorithms, path planning algorithms and motion control systems. The constant development of technologies in the fields of artificial intelligence, machine vision and robotics allows the creation of increasingly sophisticated autonomous navigation systems. However, complete autonomy and guaranteed safety of a moving object under any conditions still remain complex tasks for research.

Trajectory; algorithm; situational planning; partial uncertainty; local visibility zone; moving object.

Введение. Задача проектирования траекторий (трасс) имеют достаточно широкое применение [1, 2]. Это проектирование соединений интегральных схем, автомобильных дорог, коммуникационных сетей, различного рода траекторий. К настоящему времени разработано достаточно большое количество алгоритмов для решения задач построения траекторий в различных постановках, с учетом различного рода ограничений [3]. Траектории формируются (прокладываются) на некоторой карте местности последовательно, часто в условиях неполной определенности от начальной точки к целевой точке [5]. Цель работы заключается в разработке нового гибридного метода планирования траекторий. Процесс формирования траектории в условиях частичной неопределенности осуществля-

ется последовательно (пошагово) на двух уровнях каждого шага. Процедурами первого уровня на карте местности последовательно по шагам формируется цепочка попарно смежных регионов с локализованными препятствиями. При слиянии цепочки регионов образуется область местности, через которую прокладывается траектория.

В результате проведенных исследований было установлено, что эффективность решения во многом во многом определяется как возможностями технических средств (радаров, лидаров), позволяющих оценить текущую ситуацию, а с другой стороны методикой и методами построения траектории [3–5]. В работе рассматривается модернизированная методика пошагового проектирования траектории с использованием адаптивного опорного вектора, задающего предпочтительное направление перемещения ПО и подходы к формированию, соотношению размеров, взаимного расположения и ориентации на местности локальной зоны видимости и регионов. Кроме того, в работе предлагаются новые методика и методы проектирования траектории с учетом упомянутых факторов.

Планирование конфигурации маршрута на карте местности. Процессы синтеза траектории и передвижения по ней подвижного объекта (ПО) представляют собой сложную взаимосвязанную задачу, особенно в условиях неопределенности окружающей среды [5, 6]. Перемещение происходит практически синхронно с формированием траектории, что обусловлено динамической природой препятствий на местности. В отличие от статических картографических данных, где препятствия имеют четко определённые границы, в реальном времени ПО сталкивается с неопределённостью, вызванной отсутствием априорной информации о форме, размерах, скорости и траектории движения препятствий [3, 6, 7]. Это может быть связано с движущимися объектами (другие транспортные средства, пешеходы), изменяющимися погодными условиями (снег, дождь, туман, снижающие видимость), или неожиданно возникающими препятствиями (например, обрушение конструкций) [3, 7].

Общая структура процесса формирования маршрута и перемещения ПО включает несколько итеративных этапов, подробное описание которых представлено ниже.

1. Формирование модели карты местности. Этот этап включает в себя не только создание статической карты (например, на основе спутниковых снимков или предварительно собранных данных), но и динамическое обновление этой модели в режиме реального времени. Это достигается с помощью различных сенсорных систем, таких как GPS, IMU (инерциальная измерительная единица), лидар (лазерный дальномер), радар и камеры. Информация от этих датчиков обрабатывается и интегрируется, чтобы создать точную и актуальную модель окружающей среды. Важно отметить, что точность модели напрямую влияет на качество планирования траектории и безопасность движения ПО. Современные системы используют методы фильтрации Калмана или подобные для сглаживания данных и снижения влияния шумов. Кроме того, модель карты может быть представлена в различных форматах, например, в виде сетки (grid map), графа (graph map) или облака точек (point cloud). Выбор формата зависит от специфики задачи и возможностей системы [1–3, 7].

2. Фиксация исходной и целевой позиций. После создания модели карты местности необходимо определить начальную и конечную точки траектории. Это может быть задано пользователем или определено автоматически, например, на основе данных о задании миссии ПО. Точность фиксации позиций крайне важна для успешного построения маршрута [8, 9].

3. Генерация локальной зоны видимости (ЛЗВ). ЛЗВ представляет собой область вокруг ПО, в пределах которой его сенсорная система способна обнаруживать препятствия. Размер и форма ЛЗВ зависят от характеристик датчиков (дальность действия, угол обзора) и технических возможностей ПО. Генерация ЛЗВ – это динамический процесс, он изменяется в зависимости от положения ПО и ориентации его сенсоров. Важно отметить, что ЛЗВ не является идеальной, она может содержать погрешности из-за шумов в данных датчиков или ограничения их функциональности (например, слепые зоны) [8, 9].

4. Анализ ЛЗВ и локализация препятствий. На этом этапе происходит обработка данных от сенсорной системы (лидар, радар, камеры) для обнаружения и локализации препятствий в пределах ЛЗВ. Это сложная задача, требующая применения алгоритмов

обработки изображений и сигналов для фильтрации шумов, разделения объектов и определения их геометрических параметров. Современные системы используют методы глубокого обучения для повышения точности и скорости обнаружения препятствий. Выявленные препятствия добавляются в модель карты местности, уточняя информацию о доступном пространстве [9, 10].

5. Формирование конфигурации региона и выбор границ. Область, покрываемая ЛЗВ с выявленными препятствиями, рассматривается как отдельный регион. Для успешного планирования траектории важно определить границы входа и выхода из этого региона, учитывая расположение препятствий и доступные пути обхода [1, 3, 9, 10].

6. Фиксация входной позиции. Входная позиция первого региона совпадает с исходной позицией ЛЗВ. В последующих регионах входная позиция будет определяться выходной позицией предыдущего региона [8–10].

7. Генерация набора маршрутов (Q). На этом этапе применяется алгоритм поиска пути для генерации множества потенциальных маршрутов, соединяющих входную и выходную позиции региона. Для этого могут использоваться различные алгоритмы, такие как A^* , $Dijkstra$, RRT^* и другие. Выбор алгоритма зависит от сложности ландшафта и требований к скорости и точности планирования. Каждый маршрут оценивается по различным критериям, таким как длина, время прохождения и безопасность [1, 3, 9, 10].

8. Выбор оптимального маршрута. Из множества сгенерированных маршрутов (Q) выбирается оптимальный маршрут, удовлетворяющий заданным критериям. Критерии могут включать в себя минимальную длину пути, минимальное время прохождения, максимальное расстояние до препятствий и другие. Выбор оптимального маршрута часто выполняется с использованием методов многокритериальной оптимизации [9–11].

9. Перемещение ПО. После выбора маршрута ПО начинает движение по нему. Этот процесс сопровождается непрерывным мониторингом окружающей среды с помощью сенсорной системы и динамической корректировкой траектории в случае обнаружения новых препятствий или изменения ситуации. Эта корректировка может осуществляться путём перепланирования маршрута или локального управления движением ПО с использованием методов локальной навигации и уклонения от препятствий [1, 9–12].

Следует отметить, что синтез траектории и передвижение ПО в условиях неопределенности – это сложная задача, требующая интеграции различных сенсорных систем, алгоритмов обработки данных, алгоритмов планирования пути и систем управления движением. Постоянное развитие технологий в областях искусственного интеллекта, машинного зрения и робототехники позволяет создавать всё более совершенные системы автономной навигации. Однако, полная автономность и гарантированная безопасность ПО в любых условиях пока остаются сложными задачами для исследования [13].

Процессы формирования участка траектории и перемещения по нему объекта чередуются на каждом шаге. На рецепторной модели карты местности фиксируются две позиции: p_u – исходная позиция, p_q – целевая позиция.

Позиции p_u и p_q связываются опорной линией L_o . Длина L_o является кратчайшим расстоянием s_o между позициями p_u и p_q (рис. 1). Опорная линия служит ориентиром при прокладке траектории.

Процесс формирования траектории в условиях частичной неопределенности осуществляется последовательно (пошагово) на двух уровнях каждого шага.

Процедурами первого уровня на карте местности последовательно по шагам формируется цепочка попарно смежных регионов с локализованными препятствиями рис. 2. При слиянии цепочки регионов образуется область местности, через которую прокладывается траектория.

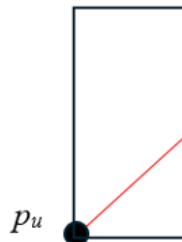


Рис. 1. Рецепторная модель карты местности (кратчайшее расстояние между позициями)

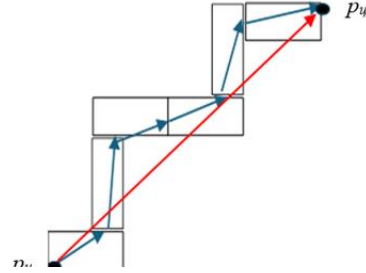


Рис. 2. Рецепторная модель карты местности (формирование цепочки попарно смежных регионов с локализованными препятствиями)

На каждом шаге t процедурами первого уровня относительно входной позиции $p_{вх}(t)$ региона r_t , достигнутой на предыдущих шагах, формируется с помощью радара ПО локальная зона видимости (ЛЗВ) $z(t)$. В пределах ЛЗВ осуществляется определение координат (локализация) всех препятствий и параметры их перемещения [10, 11].

Далее экстраполируются параметры перемещения подвижных объектов. На основе этих данных, в соответствии с конфигурацией местности, определяются граничные размеры региона r_t , покрываемого ЛЗВ. Граничные размеры региона лежат в пределах граничных размеров ЛЗВ, покрывающей регион r_t . Основное требование к региону заключается в существовании сквозного прохода через него.

Граничные размеры региона r_t считаются валидными, если существует проход через регион r_t . Изменение (деформация) конфигурации контура региона осуществляется путем параллельного сдвига сторон региона [10].

Процедурами второго уровня на шаге t формируется множество $M(t)$ траекторий прохода ПО через регион r_t от входной позиции $p_{вх}(t)$ к границе выхода из региона r_t . Для каждой траектории $m_i \in M$ вычисляется оценка пригодности ξ_i . Выбирается m_i с лучшей оценкой ξ_i и определяется выходная позиция $p_{вых}(t)$, которая является концевой вершиной траектории m_i , расположенной на границе выхода из региона r_t .

На шаге $t+1$ граница выхода из региона r_t совмещается с границей входа в регион r_{t+1} , при этом выходная позиция $p_{вых}(t)$ совмещается с входной позицией $p_{вх}(t+1)$.

ПО в течение заданного интервала времени перемещается в пределах региона r_t с учетом прогнозируемых параметров размещения подвижных и не подвижных объектов по кратчайшему пути от входной позиции p_i к новой позиции p_{i+1} , которая после прохода размещается в конце региона.

В работе описывается гибридный алгоритм планирования траектории в условиях частичной неопределенности для двумерного пространства, основанный на интеграции волнового и муравьиного алгоритмов, позволяющий строить в реальном масштабе времени траектории минимальной длины с одновременной оптимизацией ряда других критериев качества построенного пути [10–13].

Поиск решения осуществляется популяцией агентов на графе поиска решений $G=(E, U)$. Вершины множества E соответствуют ячейкам области R . Две вершины $e_i \in E$ и $e_j \in E$ связаны ребром u_k , если соответствующие им ячейки на модели местности в виде ДРП смежны и возможен переход соединения из одной ячейки в другую.

Наибольшее распространение для построения маршрута на плоскости получили волновые алгоритмы (метод распространения волнового фронта) [10, 11]. Карта местности при построении маршрута волновым алгоритмом разбивается на квадраты (ячейки), размер которых определяется на основе соотношения размеров подвижного объекта, препятствий, местности и требуемой точности.

На рис. 3 представлена модель региона местности в виде дискретного рабочего поля (ДРП). Модель такого рода называют **рецепторной**. ДРП региона соответствует граф (рис. 4). Вершины графа соответствуют ячейкам. Если две ячейки смежны, то со-

ответствующие этим ячейкам вершины графа связаны ребром. С помощью радара ПО осуществляется локализация на модели региона препятствий и параметры их перемещения [1, 3, 4, 11]. Ячейки ДРП отражают все возможные размещения ПО и препятствий в пространстве поиска.

На каждом шаге t относительно опорного вектора и входной позиции $p_{\text{вх}}(t)$ региона r_t , достигнутой на предыдущих шагах, формируется с помощью радара и лидара ПО локальная зона видимости (ЛЗВ) $z(t)$. Изначально все ячейки ДРП считаются свободными. В пределах ЛЗВ осуществляется определение координат (локализация) всех препятствий и параметры их перемещения [1, 10]. Ячейки с препятствиями помечаются.

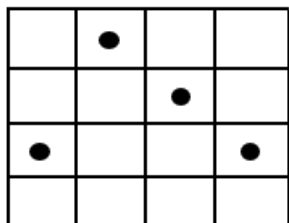


Рис. 3. Модель региона местности в виде дискретного рабочего поля

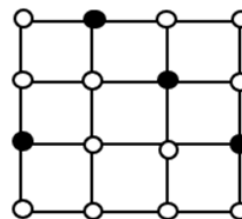


Рис. 4. Граф, соответствующий дискретному рабочему полю региона

На модели региона r_t в виде дискретного рабочего поля (ДРП) фиксируется входная $p_{\text{вх}}(t)$ позиция маршрута, проходящего через регион r_t . Фиксируется граница выхода из региона, на которой выбирается и размещается выходная позиция из региона $p_{\text{вых}}(t)$ рис. 5. На рис. 6 выбранный маршрут выделен цветом, а в качестве выходной позиции региона служит позиция q_2 .

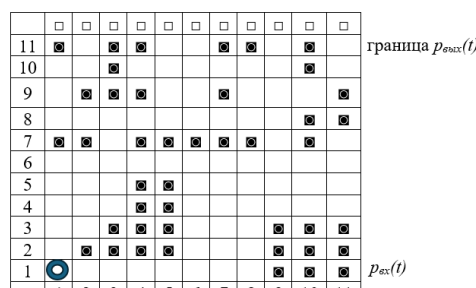


Рис. 5. Модель региона r_t в виде ДРП (исходная модель первого региона с препятствиями)

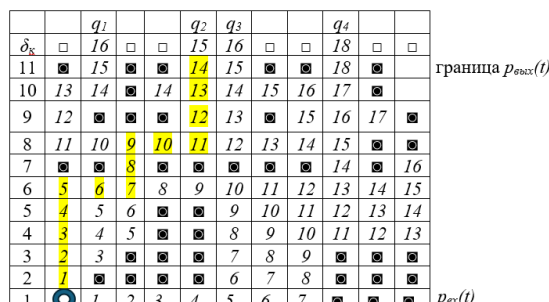


Рис. 6. Модель региона r_t в виде ДРП (построение маршрута в первом регионе на основе волновых процедур)

Процесс планирования траектории в заданном регионе представляет собой сложный и многоступенчатый процесс, который можно разделить на два ключевых этапа. На первом этапе, который можно назвать этапом построения маршрута, осуществляется распро-

странение волны от исходной позиции (обозначаемой как $p_{ax}(t)$) до границы выхода из региона (обозначаемой как r_t). В результате этого распространения формируется пространство поиска R маршрута, которое обозначается как $ППМ(t)$. Это пространство представляет собой совокупность связанных ячеек дискретного рабочего поля (ДРП), которые были достигнуты волной, и каждой из этих ячеек присваиваются определенные веса в соответствии с принятым критерием оптимальности [10, 11].

В процессе распространения волны от источника к цели ячейкам дискретного рабочего поля присваиваются весовые оценки, связанные с принятым критерием оптимальности.

После завершения распространения волны определяется множество, достигнутых на ДРП волной, ячеек $Q=\{q_k\}$, расположенных на границе выхода из региона r_t .

Если после распространения волны от источника в множество ячеек, достигнутых на ДРП волной, не вошли ячейки, расположенные на границе выхода из региона r_t , т.е. $Q=\emptyset$, то производится коррекция конфигурации региона, путем изменения его размеров. Основные процедуры изменения конфигурации региона заключаются в последовательном наращивании слоя ячеек по периметру конфигурации модели региона [10, 11, 13].

На рис. 7 представлена модель региона, на которой выполнено распространение волны от входной ячейки. Расположение препятствий не допускает достижения волной ячеек, расположенных на границе выхода из региона.

На рисунке 8 представлена модель этого же региона, после наращивания слоя ячеек по периметру конфигурации модели. В новых ячейках отражаются препятствия. После этого в рамках новой конфигурации региона производится дополнительное распространение волны с выходом на границу выхода [1, 3, 10, 11].

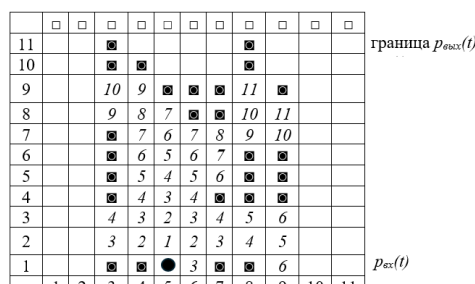


Рис. 7. Процесс модернизации конфигурации региона (исходная модель региона не позволяющая выполнить выход волны к границе)

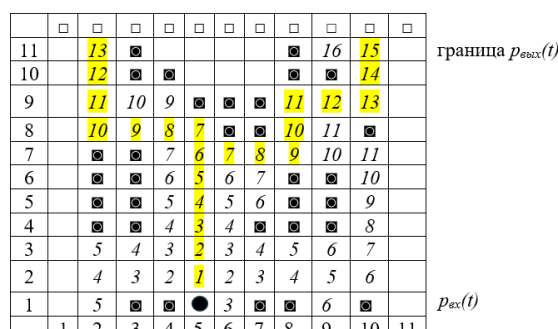


Рис. 8. Процесс модернизации конфигурации региона (модернизированная структура модели региона, допускающая выход волны к границе)

Для каждой достигнутой волной вершины $q_k \in Q$ на границе выхода из региона в пространстве поиска на ДРП может существовать несколько вариантов маршрута, связывающего вершину q_k с вершиной $p_{ax}(t)$.

На базе сформированного в регионе пространства поиска R муравьиным алгоритмом (МА) от каждой ячейки $q_k \in Q$ формируется маршрут $M_k(t)$, связывающий q_k с $p_{ex}(t)$ [12].

Построение каждого маршрута $M_k(t)$ выполняется популяцией P_k муравьев на графе поиска решений $G=(X,U)$. Вершины множества X соответствуют ячейкам области R . Две вершины $x_i \in X$ и $x_j \in X$ связаны ребром, если соответствующие им ячейки на модели местности в виде ДРП смежны и возможен переход маршрута из одной ячейки в другую.

Каждая итерация l муравьиного алгоритма включает три этапа. На первом этапе каждый агент a_n популяции P_k конструктивным алгоритмом формирует на графе G маршрут $m_{kn}(t)$ из вершины q_k , в вершину $p_{ex}(t)$.

Подобно волновому алгоритму каждый муравей конструктивным алгоритмом строит на ППТ(l) маршрут, представляющий совокупность ячеек ДРП с последовательно уменьшающимся весом. Всеми муравьями популяции P_k на базе каждой ячейки q_k будет построено множество M_k вариантов маршрута одной минимальной длины d_k , но отличающимися конфигурациями. В качестве оценки каждого маршрута m_{kn} служит параметр f_{kn} – число поворотов маршрута. Запоминается лучшая оценка f_k и маршрут, полученные агентом a_n на l -ой итерации.

На втором этапе итерации МА каждый агент a_n откладывает феромон на ребрах маршрута m_{kn} , в количестве пропорциональном оценке f_{kn} маршрута m_{kn} .

На третьем этапе итерации осуществляется общее испарение (уменьшение) количества феромона на всех ребрах графа поиска решений $G=(X,U)$ на некоторую величину, запоминается решение с лучшей оценкой [12, 14–17].

Целью муравьиного алгоритма является поиск маршрута $m_k^* \in M_k$ с минимальным значением оценки f_{kn} .

Для каждой ячейки $q_k \in Q$ определяется расстояние d_k от q_k до опорного вектора L_o . Для каждой траектории $M_k \in M$ вычисляется оценка пригодности ξ_k .

$$\xi_k = \alpha f_{ki} + \beta d_k + \gamma d_k.$$

В качестве маршрута, проложенного через регион r_t выбирается маршрут m_k^* с лучшим значением оценки пригодности ξ_k , а в качестве выходной позиции региона r_t выбирается ячейка q_k , соответствующая вышеприведенным условиям.

Для примера, приведенного на рис. 8 выбранный маршрут выделен цветом, а в качестве выходной позиции региона служит позиция q_2 .

На рис. 9 представлен пример второго региона, модель которого сформирована относительно выходной позиции первого региона. В пределах ЛЗВ определены координаты (локализация) всех препятствий и параметры их перемещения [11, 16, 18]. Ячейки с препятствиями помечены.

На втором этапе прокладки траектории в регионе определяется выходная ячейка $p_{вых}(t)=q_k(t)$ и осуществляется выбор на ДРП региона маршрута, связывающего ячейки $p_{ex}(t)$ и $p_{вых}(t)$. Фиксируется весовые оценки δ_k множества Q ячеек ДРП.

В примере, представленном на рис. 6: $Q=\{q_1, q_2, q_3, q_4\}$; $\delta_1=16, \delta_2=15, \delta_3=16, \delta_4=18$.

В процессе распространения волны от источника к цели ячейкам дискретного рабочего поля присваиваются весовые оценки, связанные с принятым критерием оптимальности. В примере, представленном на рисунке 10: $\delta_1=16, \delta_2=14, \delta_3=13, \delta_4=15, \delta_5=17$ [1–12, 16–18].

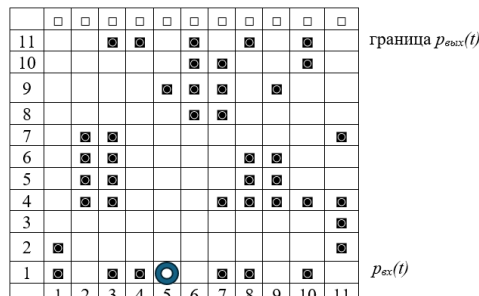


Рис. 9. Пример второго региона, модель которого сформирована относительно выходной позиции первого региона (модель региона с препятствиями)

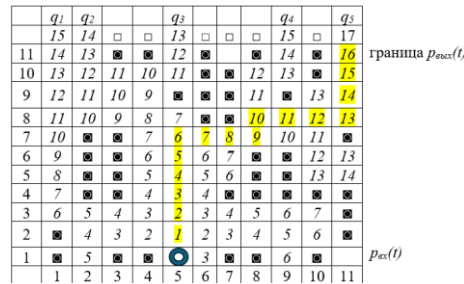


Рис. 10. Пример второго региона, модель которого сформирована относительно выходной позиции первого региона (построение маршрута на основе волновых процедур)

Муравьиным алгоритмом на базе сформированного пространства поиска R каждой ячейки $q_k \in Q$ формируется маршрут $m_k(t)$, связывающий q_k с $p_{\text{вх}}(t)$.

Процедурами второго уровня на шаге t формируется множество M траекторий прохода ПО через регион r_t , от входной позиции $p_{\text{вх}}(t)$ к границе выхода из региона r_t . Для каждой траектории $m_i \in M$ вычисляется оценка пригодности ξ_i . Выбирается m_i с лучшей оценкой ξ_i и определяется выходная позиция $p_{\text{вых}}(t)$, которая является конечной вершиной траектории q_i , расположенной на границе выхода из региона r_t .

На шаге $t+1$ граница выхода из региона r_t совмещается с границей входа в регион r_{t+1} , при этом выходная позиция $p_{\text{вых}}(t)$ совмещается с входной позицией $p_{\text{вх}}(t+1)$.

ПО – в течение заданного интервала времени перемещается в пределах региона r_t с учетом прогнозируемых параметров размещения подвижных и не подвижных объектов по кратчайшему пути от входной позиции p_i к новой позиции p_{i+1} , которая после прохода размещается в конце региона [11, 19].

На третьем этапе путем распространения на ДРП волны от источника (точка $ТП(t)$) к точке *цель* формируется пространство поиска траектории – $ППТ(l)$, представляющая совокупность связанных ячеек ДРП, достигнутых волной, с присвоенными им весами [11, 12, 19–20].

На четвертом этапе муравьиным алгоритмом на сформированной области $ППТ(l)$ прокладывается траектория $M(l)$ из точки *цель* к точке $ТП(l)$ [18–20].

На рис. 11 представлен процесс слияния маршрутов, построенных в первом и втором регионах.

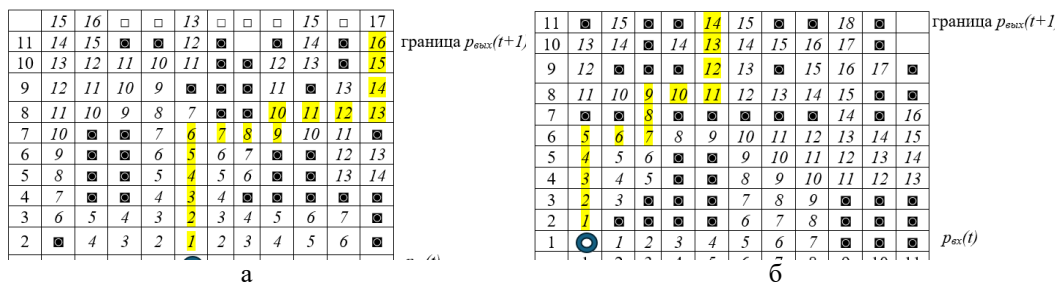


Рис. 11. Пример слияния 1 и 2 регионов (а – второй регион, б – первый регион)

Алгоритм планирования траектории подвижным объектом.

1. Формирование рецепторной модели карты местности с заданным шагом дискретизации.

2. На рецепторной модели карты местности фиксируются две позиции: p_u – исходная позиция, p_v – целевая позиция.

3. Позиции p_u и p_v связываются опорным вектором L_o . Длина L_o является кратчайшим расстоянием s_o между позициями p_u и p_v .

4. $t=1$. (t – номер шага).

5. На основе данных сенсорной системы ПО относительно позиции $p_{\text{вх}}(t)$ и опорного вектора, генерируется контур локальной зоны видимости (ЛЗВ) $z(p_{\text{вх}}(t))$. Размеры и форма контура ЛЗВ определяются техническими возможностями сенсорной системы ПО.

6. В пределах ЛЗВ с помощью радара и лидара ПО осуществляется обнаружение и определение координат (локализация) всех препятствий.

Задача обнаружения объекта заключается в задаче нахождения в двухмерном случае областей ЛЗВ, покрываемых препятствиями, а также нанесение меток на всех дискретах ДРП, покрываемых препятствиями. Для обнаружения объектов по моноизображениям наиболее точными являются методы, основанные на применении свёрточных нейронных сетей.

7. В границах ЛЗВ $z(t)$ формируются конфигурация, ориентация и размеры региона r_t . На размеры региона накладываются ограничения. Регион r_t должен полностью покрываться ЛЗВ $z(t)$.

8. Фиксируется расположение региона r_t на карте местности.

9. Фиксируется граница региона, на которой размещается входная позиция $p_{вх}(t)$ в регион r_t , и граница региона, на которой размещается выходная позиция из региона $p_{вых}(t)$.

10. Формируются входная позиция региона r_t . Если $t=1$ (номер шага), то $p_{вх}(t) = p_u$. Если $t>1$, то в качестве входной позиции в регион r_t , служит позиция $p_{вх}(t)=p_{вых}(t-1)$.

11. Подвижный объект помещается во входную позицию $p_{вх}(t)$ региона r_t .

Далее экстраполируются параметры перемещения подвижных объектов.

12. Выполняется первый этап прокладки траектории в регионе r_t от позиции $p_{вх}(t)$ до границы выхода из региона r_t .

Путем распространения на ДРП волны от источника (точка $p_{вх}(t)$) к границе выхода из региона r_t формируется пространство поиска траектории, представляющее совокупность связанных ячеек ДРП, достигнутых волной, с присвоенными им весами.

13. Если волна не достигла границы выхода из региона r_t , то переход к пункту 14, иначе переход к пункту 15.

14. Производится изменение контура и размеров региона, без изменения $p_{вх}(t)$ и выполняется дополнительное распространение волны в обновленных границах региона. Переход к пункту 13.

15. Определяется множество достигнутых волной ячеек $Q=\{q_k\}$, расположенных на границе выхода из региона r_t . Если в состав региона входит целевая позиция – p_u , то $Q=\{p_u\}$. Фиксируется весовые оценки δ_i множества ячеек Q .

16. Построение муравьиным алгоритмом для каждой ячейки q_k маршрута $M_k(t)$ от q_k до $p_{вх}(t)$. Расчет оценок ξ_k пригодности всех маршрутов.

17. Выбор маршрута $M_k^*(t)$ от q_k до $p_{вх}(t)$ с лучшей оценкой ξ_k . Фиксация $p_{вых}(t)=q_k^*$, где q_k^* принадлежит лучшему маршруту. Маршрут $M_k^*(t)$ включается в множество маршрутов P , построенных в регионах.

18. ПО перемещается в позицию $p_{вых}(t)$.

19. Если маршрут $M_k^*(t)$ не достиг p_u , то формируется опорный вектор L_t , связывающий $p_{вых}(t)$ с p_u , $t=(t+1)$ и переход к пункту 6, иначе переход к пункту 20.

20. На базе построенных маршрутов в отдельных регионах формируется траектория маршрута из позиции p_u в позицию p_u .

21. Конец работы алгоритма.

Процесс формирования и ориентации локальной зоны видимости и покрываемого ею региона на карте местности выполняется относительно текущего опорного вектора, рис. 12.

Схема алгоритма планирования траектории ПО представлена на рис. 13.

На рис. 12 на первом шаге в качестве текущей опорной линии служит линия L_o , связывающая позиции p_u и p_u . Через позицию p_u перпендикулярно к опорному вектору L_o проводится базовая линия, который служит основанием для формируемой ЛЗВ и региона. Позиция p_u рассматривается в качестве входной позиции региона r_1 .

На рис. 12,а приведено взаимное расположение опорного вектора L_o , базовой линии, сформированных области ЛЗВ $z(1)$ и региона r_1 .

После построения в регионе r_1 маршрута с лучшим значением оценки пригодности и выборе выходной позиции $p_{вых}(1)$ региона r_1 формируется текущий опорный вектор L_1 , рис. 12,б, связывающего позиции $p_{вых}(1)$ и p_u .

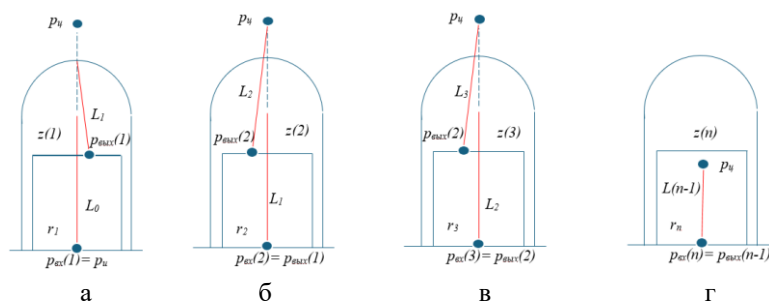


Рис. 12. Процесс формирования и ориентации локальной зоны видимости: а – взаимное расположение опорного вектора L_0 , базовой линии, сформированных области ЛЗВ $z(1)$ и региона r_1 , б – формирование текущего опорного вектора L_1 , связывающего позиции $p_{вых}(1)$ и $p_{ц}$, в – формирование текущего опорного вектора L_2 , связывающего позиции $p_{вых}(2)$ и $p_{ц}$, г – последний регион

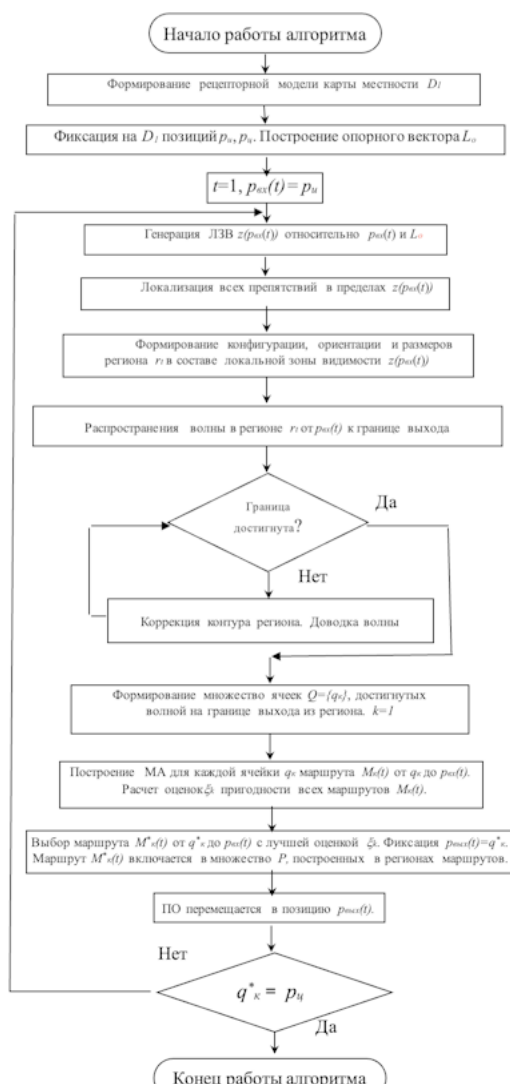


Рис. 13. Схема работы алгоритма

На втором шаге позиция $p_{\text{вых}}(1)$ служит в качестве входной позиции $p_{\text{вх}}(2)=p_{\text{вых}}(1)$ региона r_2 . Затем относительно опорного вектора L_1 через $p_{\text{вх}}(2)$ проводится базовая линия на которой формируются и располагаются область ЛЗВ $z(2)$ и регион r_2 .

После построения в регионе r_2 маршрута и выборе выходной позиции $p_{\text{вых}}(2)$ региона r_2 формируется текущий опорный вектор L_2 рис. 12,в, связывающего позиции $p_{\text{вых}}(2)$ и $p_{\text{ц}}$.

Если на некотором шаге n окажется, что позиция цели $p_{\text{ц}}$ окажется внутри региона r_n , то регион r_n будет последним, рис. 12,г.

Отметим, что если при прокладке маршрута через регион волна, распространяемая от входной позиции в регион, не достигает выходной границы региона, то размеры региона увеличиваются, до тех пор, пока не будет достигнута выходная граница региона.

На размеры региона накладываются ограничения. В составе региона не допускается наличие областей, не покрываемых локальной зоной видимости, так как в этих областях могут быть не учтенные препятствия [10, 18–20].

В этом случае в качестве выходной позиции региона выбирается ближайшая к позиции $p_{\text{ц}}$ позиция, расположенная на одной из границ покрываемого ЛЗВ региона.

Вычислительный эксперимент. Гибридная многоагентная система ситуационного планирования траектории в условиях частичной неопределенности реализована в виде комплекса программ, базирующихся на парадигмах роевых алгоритмов и гибридной стратегии поиска в глубину.

Для оценки эффективности разработанных методик и программного обеспечения авторами разработаны контрольные примеры построения маршрутов, для которых заранее известно оптимальное значение F суммарной стоимости траекторий в регионах, входящих в общую траекторию следования подвижного объекта в условиях частичной неопределенности для двумерного пространства.

С помощью разработанного программного средства было сгенерировано 5 примеров М1-М5.

Каждый пример запускался 10 раз. В табл. 1 для каждого примера приводится среднее значение отклонения оценки решения от оптимального в %, а также среднее значение отклонения оценки решения (длина траектории). В качестве объекта сравнения использовалась суммарная длина траектории, проложенной через опорные векторы, связывающих исходную и целевую позиции.

nR – число регионов;

nP – число препятствий;

LM – длина траектории;

LV – длина опорного вектора.

В результаты экспериментов было установлено, что показатели качества разработанных алгоритмов имеют более высокие значения чем в работах [6–10].

Таблица 1

Класс задач	M1	M2	M3	M4	M5
$X \times Y =$	6×6	6×7	6×6	6×6	6×6
nR	5	6	7	8	9
nP	5	10	16	18	20
LM	35	48	58	66	75
LV	32	43	52	62	70
$LV/LM\%$	91	89	89	93	93

В результате проведенных экспериментов были найдены лучшие эвристики для решения задач, связанных с выбором точек сопряжения двух соседних регионов

Временная сложность алгоритма (BCA), полученная экспериментальным путем, практически совпадает с теоретическими исследованиями и для рассмотренных тестовых задач составляет ($BCA \approx O(n^2)$).

Заключение. В работе предлагается гибридный алгоритм, позволяющий строить в реальном масштабе времени траектории минимальной длины с одновременной оптимизацией ряда других критериев качества построенного пути. Отличительная особенность заключается в том, что перемещение подвижного объекта по траектории происходит практически одновременно с ее формированием (прокладкой), в текущем режиме времени.

В результате проведенных исследований было установлено, что предложенная модернизированная методика пошагового проектирования траектории позволила повысить эффективность решения, что подтверждено результатами, полученными во время проведения экспериментальных исследований. Анализ показал, что значительное влияние на улучшение характеристик оказало использование адаптивного опорного вектора, задающего предпочтительное направление перемещения ПО, модернизированная методика пошагового проектирования траектории и подходы к формированию и размеров, соотношению взаимного расположения и ориентации на местности локальной зоны видимости и регионов. Использование предложенной методики и методов проектирования траектории с учетом упомянутых факторов позволяют упростить конфигурацию траектории и минимизировать ее общую длину, в результате чего снижаются вычислительные затраты и время прохождения по маршруту. Источником усовершенствования может быть более детальная проработка вопросов, связанных с формированием локальной зоны видимости и выбором (сменой) текущих исходных позиций, что ускорит процесс достижения подвижным объектом целевого состояния.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пишихов В.Х. и др.* Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / под ред. В.Х. Пишихова. – М.: Физматлит, 2014. – 300 с.
2. *Гузик В.Ф., Переверзев В.А., Пьявченко А.О., Сапрыкин Р.В.* Принципы построения экстраполирующего многомерного нейросетевого планировщика интеллектуальной системы позиционно-траекторного управления подвижными объектами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 2 (175). – С. 67-80.
3. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В.* Алгоритмы адаптивных позиционно-траекторных систем управления подвижными объектами // Проблемы управления. – 2015. – № 4. – С. 66-74.
4. *Нейддорф Р.А., Полях В.В., Черногоров И.В., Ярахмедов О.Т.* Исследование эвристических алгоритмов в задачах прокладки и оптимизация маршрутов в среде с препятствиями // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 3 (176). – С. 127-143.
5. *Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.* Биоинспирированный алгоритм планирования траектории в условиях частичной неопределенности и наличии перемещающихся препятствий // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Сб. научных трудов XI-й Международной научно-технической конференции. – Смоленск: Универсум, 2022. – С. 298-309.
6. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Методы и модели коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.
7. *Котов Д.В., Лебедев О.Б.* Управление передвижением группы БПЛА с соблюдением геометрической структуры строя на основе альтернативной коллективной адаптации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 155-167.
8. *Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Бесхмельнов М.И.* Децентрализованное управление группой автономных подвижных объектов при формировании траектории движения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 6. – С. 177-190.
9. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю.* Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. – М.: Наука, 2011.
10. *Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.* Гибридный алгоритм ситуационного планирования траектории на плоскости в условиях частичной неопределенности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2018. – № 1. – С. 76-93.
11. *Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.* Планирование двухмерной траектории в условиях частичной неопределенности на основе интеграции волнового и муравьиного алгоритмов // Сб. трудов V Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием «Гибридные и синергетические интеллектуальные системы». – Зеленоградск: Изд-во Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта. – 2020. – С. 87-94.
12. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие. – 3-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – 448 с.
13. *Городецкий В.И.* Управление коллективным поведением роботов в автономной миссии // Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – № 1 (10). – С. 40-54.
14. *Chen S., Eshaghian M.M.* A fast recursive mapping algorithm // Department of computer and information science. – New Jersey, USA: New Jersey, 2013. – P. 219-227.
15. *Кузнецов А.В.* Модель движения и взаимодействия системы интеллектуальных агентов // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2018. – № 2. – С. 130-138.

16. Байгутлина И.А. Реализация новых сервисов с использованием робототехнических комплексов // Славянский форум. – 2021. – № 4 (34). – С. 162-170.
17. Морозова Н.С. Децентрализованное управление движением строя роботов при динамически изменяющихся условиях // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2015. – Т. 1. – С. 65-74.
18. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Управление движением группы мобильных роботов в колонне // Научно-практический журнал Информатизация и связь. – 2021. – № 3. – С. 7-11.
19. Карпов В.Э. Коллективное поведение роботов. Желаемое и действительное // Современная мехатроника: Сб. научных трудов Всероссийской научной школы. – 2011. – С. 35-51.
20. Усанова Р.А. Актуальные проблемы управления группой БПЛА // Тр. тринадцатой общероссийской молодежной научно-технической конференции: в 2-х т. Сер. Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ». – СПб., 2021. – № 76. – С. 128-130.

REFERENCES

1. Pshikhov V.Kh. i dr. *Intellectual'noe planirovanie traektoriy podvizhnykh ob"ektov v sredakh s prepyatstviyami* [Intelligent planning of trajectories of moving objects in environments with obstacles], ed. by V.Kh. Pshikhov. Moscow: Fizmatlit, 2014, 300 p.
2. Guzik V.F., Pereverzev V.A., Pyavchenko A.O., Saprykin R.V. Printsipy postroyeniya ekstrapoliruyushchego mnogomernogo neyrosetevogo planirovshchika intellektual'noy sistemy pozitsionno-traekornogo upravleniya podvizhnymi ob"ektami [Principles of constructing an extrapolating multidimensional neural network planner of an intelligent system of position-trajectory control of moving objects], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 2 (175), pp. 67-80.
3. Pshikhov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V. Algoritmy adaptivnykh pozitsionno-traekornykh sistem upravleniya podvizhnymi ob"ektami [Algorithms of adaptive position-trajectory control systems for moving objects], *Problemy upravleniya* [Problems of Control], 2015, No. 4, pp. 66-74.
4. Neydorf R.A., Polyakh V.V., Chernogorov I.V., Yarakhmedov O.T. Issledovanie evristicheskikh algoritmov v zadachakh prokladki i optimizatsiya marshrutov v srede s prepyatstviyami [Study of heuristic algorithms in problems of laying and optimizing routes in an environment with obstacles], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 3 (176), pp. 127-143.
5. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Bioinspirirovannyi algoritm planirovaniya traektorii v usloviyakh chastichnoy neopredelennosti i nalichii peremeshchayushchikhsya prepyatstviy [Bioinspired algorithm for trajectory planning under partial uncertainty and in the presence of moving obstacles], *Integririrovannye modeli i myagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte: Sb. nauchnykh trudov XI-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Integrated models and soft computing in artificial intelligence: Collection of scientific papers of the XI International Scientific and Technical Conference]. Smolensk: Universum, 2022, pp. 298-309.
6. Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G. Metody i modeli kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Methods and models of collective control in groups of robots]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 280 p.
7. Kotov D.V., Lebedev O.B. Upravlenie peredvizheniem gruppy BPLA s soblyudeniem geometricheskoy struktury stroya na osnove al'ternativnoy kollektivnoy adaptatsii [Control of movement of a group of UAVs with observance of the geometric structure of the formation based on alternative collective adaptation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 1, pp. 155-167.
8. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Beskhmel'nov M.I. Detsentralizovannoe upravlenie gruppoy avtonomnykh podvizhnykh ob"ektov pri formirovani traektorii dvizheniya [Decentralized control of a group of autonomous mobile objects when forming a trajectory of movement], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 6, pp. 177-190.
9. Pshikhov V.Kh., Medvedev M.Yu. Upravlenie podvizhnymi ob"ektami v opredelennykh i neopredelennykh sredakh [Control of moving objects in certain and uncertain environments]. Moscow: Nauka, 2011.
10. Lebedev B.K., Lebedev O.B. Gibridnyy algoritm situatsionnogo planirovaniya traektorii na ploskosti v usloviyakh chastichnoy neopredelennosti [Hybrid algorithm for situational trajectory planning on a plane under partial uncertainty], *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Seriya "Priborostroenie"* [Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series: Instrument Engineering], 2018, No. 1, pp. 76-93.
11. Lebedev B.K., Lebedev O.B. Planirovanie dvukhmernoy traektorii v usloviyakh chastichnoy neopredelennosti na osnove integratsii volnovogo i murav'inogo algoritmov [Two-dimensional trajectory planning under partial uncertainty based on the integration of wave and ant algorithms], *Sb. trudov V Vserossiyskoy Pospelovskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Gibridnye i sinergeticheskie intellektual'nye sistemy»* [Collection of works of the V All-Russian Pospelovskaya conference with international participation "Hybrid and synergetic intelligent systems"]. Zelenogradsk: Izd-vo Baltiyskiy federal'nyy universitet im. Immanuila Kanta, 2020, pp. 87-94.

12. Karpenko A.P. *Sovremennye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennye prirodoy: ucheb. posobie* [Modern algorithms for search engine optimization. Algorithms inspired by nature: a tutorial]. 3rd ed. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2021, 448 p.
13. Gorodetskiy V.I. Upravlenie kolektivnym povedeniem robotov v avtonomnoy missii [Control of collective behavior of robots in an autonomous mission], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2016, No. 1 (10), pp. 40-54.
14. Chen S., Eshaghian M.M. A fast recursive mapping algorithm, *Department of computer and information science*. New Jersey, USA: New Jersey, 2013, pp. 219-227.
15. Kuznetsov A.V. Model' dvizheniya i vzaimodeystviya sistemy intellektual'nykh agentov [Model of movement and interaction of a system of intelligent agents], *Vestnik VGU. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii* [VSU Bulletin. Series: Systems analysis and information technology], 2018, No. 2, pp. 130-138.
16. Baygutlina I.A. Realizatsiya novykh servisov s ispol'zovaniem robototekhnicheskikh kompleksov [Implementation of new services using robotic complexes], *Slavyanskiy forum* [Slavic forum], 2021, No. 4 (34), pp. 162-170.
17. Morozova N.S. Detsentralizovannoe upravlenie dvizheniem stroya robotov pri dinamicheski izmenyayushchikhsya usloviyakh [Decentralized control of the movement of a robot formation under dynamically changing conditions], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial Intelligence and Decision Making], 2015, Vol. 1, pp. 65-74.
18. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Upravlenie dvizheniem gruppy mobil'nykh robotov v kolonne [Control of the movement of a group of mobile robots in a column], *Nauchno-prakticheskiy zhurnal Informatizatsiya i svyaz'* [Scientific and practical journal Informatization and Communications], 2021, No. 3, pp. 7-11.
19. Karpov V.E. Kollektivnoe povedenie robotov. Zhelaemoe i deystvitel'noe [Collective behavior of robots. Desired and actual], *Sovremennaya mekhatronika: Sb. nauchnykh trudov Vserossiyskoy nauchnoy shkoly* [Modern mechatronics: Collection of scientific papers of the All-Russian scientific school], 2011, pp. 35-51.
20. Uspanova R.A. Aktual'nye problemy upravleniya gruppoy BPLA [Actual problems of UAV group control], *Tr. trinadtsatoy obshcherossiyskoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii: v 2-kh t. Ser. Biblioteka zhurnala «Voenmekh. Vestnik BGTU»* [Proc. of the thirteenth all-Russian youth scientific and technical conference: in 2 volumes. Series. Library of the journal "Voenmekh. Bulletin of BSTU"]. Saint Petersburg, 2021, No. 76, pp. 128-130.

Бесхмельнов Максим Игоревич – МИРЭА – Российский технологический университет; e-mail: m_beskhmelnov@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89252622177; кафедра информатики; преподаватель.

Лебедев Борис Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: lebedev.b.k@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 89282897933; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; д.т.н.; профессор.

Лебедев Олег Борисович – МИРЭА – Российский технологический университет; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89085135512; кафедра информатики; д.т.н.; профессор.

Beskhmelnov Maxim Igorevich – MIREA – Russian University of Technology; e-mail: m_beskhmelnov@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79252622177; the Department of Computer Science; teacher.

Lebedev Boris Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: lebedev.b.k@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79282897933; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; dr. of eng. sc.; professor.

Lebedev Oleg Borisovich – MIREA – Russian University of Technology; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79085135512; the Department of Computer Science; dr. of eng. sc.; professor.

А.М. Маевский, И.А. Печайко, М.А. Алексеев, Н.М. Буров

**РАЗРАБОТКА РОБОТИЗИРОВАННОГО ИМИТАТОРА ПОДВОДНОГО
АППАРАТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБОВ АВТОНОМНОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕЗИДЕНТНЫХ АНПА С ОБЪЕКТАМИ ПОДВОДНОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Представлен процесс разработки имитатора подводного аппарата (ИПА) с установленным 5-степенным подводным манипуляторным комплексом (МК). Имитатор предназначен для комплексной отработки автономного взаимодействия морского робототехнического комплекса (МРТК) с объектами подводной инфраструктуры. В частности, рассматривается пример решения задач работы имитатора с макетом подводной панели подводного добычного комплекса (ПДК) и решение задачи определения конкреции и их автономного забора при помощи имитатора и МК. Современные тенденции развития подводной робототехники ориентированы на создание резидентных автономных систем, способных работать в удаленных и труднодоступных районах Мирового океана в круглогодичном режиме. Развитие резидентных технологий связано с необходимостью снижения операционных затрат, минимизации рисков для персонала и увеличения времени автономного функционирования подводных комплексов. Применение таких технологий особенно актуально в условиях освоения дальнего шельфа, где традиционные методы эксплуатации подводных аппаратов сталкиваются с техническими и экономическими ограничениями. Необходимость проведения работ на дальнем шельфе обусловлена возрастающим спросом на углеводородные ресурсы и исчерпанием легко доступных месторождений на континентальном шельфе. Согласно прогнозам, перспективные глубоководные районы, расположенные на глубинах более 1000 м, обладают значительным потенциалом добычи нефти и газа. По оценкам специалистов, объем извлекаемых запасов в таких районах может составлять сотни миллиардов баррелей углеводородного сырья, что делает разработку эффективных автономных решений стратегически важной задачей для нефтегазовой отрасли. В работе представлены программно-аппаратные решения, используемые при реализации ИПА. Приведена структурная схема конструкции, описана архитектура программного обеспечения и особенности применения систем искусственных нейронных сетей (ИНС) в составе системы технического зрения (СТЗ) ИПА. Использование ИНС позволяет значительно повысить автономность работы подводных манипуляторов при выполнении сложных технологических операций, таких как захват объектов с грунта, работа с объектами донной инфраструктуры и др. В заключении продемонстрированы полученные результаты, подтверждающие работоспособность принятых конструктивных, программных и аппаратных решений при выполнении реальных работ в автономном режиме с макетами рабочих инструментов hot-stab и torque-tool и ответными частями, расположенными на макете панели ПДК.

Подводный манипулятор; морские робототехнические комплексы; система управления; система технического зрения; искусственный интеллект.

A.M. Mayevskiy, I.A. Pechayko, M.A. Alekseyev, N.M. Burov

**DEVELOPMENT OF AN UNDERWATER VEHICLE ROBOTIC SIMULATOR
TO STUDY METHODS OF RESIDENT AUVs AUTONOMOUS INTERVENTION
WITH UNDERWATER INFRASTRUCTURE OBJECTS**

The article presents the process of developing an underwater vehicle simulator (USV) with an installed 5-degree underwater manipulator complex (MC). The simulator is designed for complex testing of autonomous interaction of a marine robotic complex (MRC) with underwater infrastructure objects. In particular, an example of solving the problems of simulator operation with a model of an underwater panel of an underwater production complex (UPC) and solving the problem of determining concretions and their autonomous collection using the simulator and MC are considered. Modern trends in the development of underwater robotics are focused on the creation of resident autonomous systems capable of operating in remote and hard-to-reach areas of the World Ocean all year round. The development of resident technologies is associated with the need to reduce operating costs, minimize risks to personnel and increase the autonomous functioning time of underwater complexes. The use of such technologies is especially relevant in the conditions of offshore shelf development, where traditional methods of operating underwater vehicles encounter technical and economic limitations. The need to carry out work on the

distant shelf is due to the increasing demand for hydrocarbon resources and the depletion of easily accessible deposits on the continental shelf. According to forecasts, promising deep-water areas located at depths greater than 1000 m have significant potential for oil and gas production. According to experts, the volume of recoverable reserves in such areas can amount to hundreds of billions of barrels of hydrocarbon raw materials, which makes the development of effective autonomous solutions a strategically important task for the oil and gas industry. The paper presents software and hardware solutions used in the implementation of the USV. A structural diagram of the design is provided; the software architecture and features of the use of artificial neural network (ANN) systems as part of the technical vision system (TVS) of the USV are described. The use of TVS allows to significantly increasing the autonomy of underwater manipulators when performing complex technological operations, such as capturing objects from the ground, working with bottom infrastructure objects, etc. In conclusion, the obtained results are demonstrated, confirming the operability of the adopted design, software and hardware solutions when performing real work in autonomous mode with mock-ups of hot-stab and torque-tool working tools and mating parts located on the mock-up of the UPC panel.

Underwater manipulator; marine robotic systems; control system; machine vision system; artificial intelligence.

Введение. На сегодняшний день, область подводной резидентной робототехники за рубежом находится на этапе прикладного применения для решения реальных коммерческих задач.

Прикладные исследования в области автоматизированных и автоматических бортовых манипуляторных комплексов необитаемых подводных аппаратов (НПА) стартовали в 1996 году. На момент 2024 года один из ведущих мировых центров компетенций перехода от мониторинговых НПА к интервенционным – университет Жироны, уже более 15 лет ведет разработку моделей своего интервенционного АНПА (на англ. Interventional AUV (i-AUV)). Особенностью интервенционных аппаратов является наличие манипуляторного комплекса и способности аппарата в автономном режиме осуществлять различные операции с использованием МК. В 2014 разработчики университета Жироны продемонстрировали работу своего аппарата в испытательном бассейне [1, 2]. Основной задачей в тот период времени являлась отработка технологий взаимодействия с макетом рабочей панели (рис. 1,а). На тот момент разработчиками была проведена интеграция имеющихся систем распознавания и обнаружения образов, с целью определения состояния рабочих элементов на макете подводной панели. Следующим этапом являлась отработка технологии позиционирования и докования АНПА [3,4] (рис. 1,б). В 2022 году все те же разработки, понимая тенденции развития технологий группового управления (проект Twinbot), продемонстрировали сопряженную работу двух аппаратов с целью укладки трубопровода [5] (рис. 1,в).

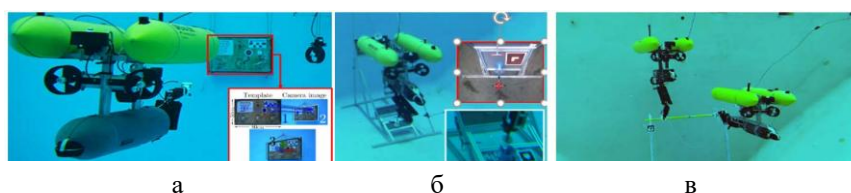


Рис. 1. Демонстрация работы i-AUV Girona при взаимодействии с панелью, доковании и укладки трубопровода

В 2024 году разработчики из университета Жироны представили автономную систему очистки подводных объектов. Интервенционный автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА) "Жирона 1000" (Girona1000 AUV) наглядно выполнил автономную миссию: выход на подводный объект и очистка его элементов от биологического обрастания с использованием зачистной машинки (рис. 2), установленной на бортовом многозвенном манипуляторном комплексе [6].

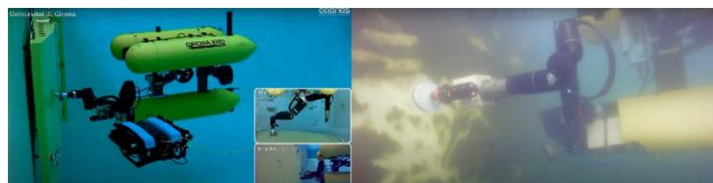


Рис. 2. Автономное техническое обслуживание подводных объектов с использованием АНПА

Помимо университета Жироны, к 2024 году в опытно-коммерческую эксплуатацию были переданы подводные резидентные интервенционные аппараты таких компаний как Oceaneering International, Inc., США (аппарат Freedom и др.) [7], Saab Seaeye Limited, Великобритания (аппарат Sabertooth), DFKI [8], Германия (аппарат FlatFish) [9] (рис. 3).

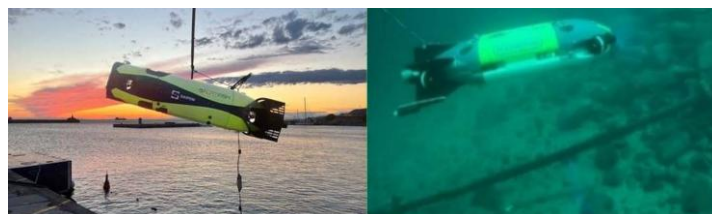


Рис. 3. Современные подводные резидентные аппараты: Freedom и FlatFish

Очевидно, что такие технологии необходимы и в Российской Федерации. Имеющиеся целевые программы и указы Президента РФ, направленные на развитие арктического региона 2030, программа развития судостроения 2030 и необходимость обеспечения безопасности северного морского пути и объектов стратегического назначения прямо указывают на потребность интенсивного развития комплексных технологий, обеспечивающих долгосрочную и автономную работу МРТК.

На сегодняшний день, развитием отечественных прикладных разработок в данной области занимаются такие предприятия, образовательные и научные учреждения как АО "НПП ПТ "Океанос", ФГБОУ ВО СПбГМТУ, АО "Концерн "НПО "Аврора" и ФГУБН ИПМТ им. академика М.Д. АГЕЕВА ДВО РАН [7–12].

С целью углубленной отработки технологий уже имеющихся в заделе АО «НПП ПТ «Океанос» и дальнейшего развития сопутствующих программно-аппаратных средств, в рамках перспективного развития востребованных резидентных технологий, авторами, в содружестве с конструкторским коллективом АО «НПП ПТ «Океанос», был разработан стенд натурной отработки технологий взаимодействия подводного манипуляторного комплекса и ИПА, позволяющий обеспечить дополнительное перемещение в трех плоскостях (степенях свободы), к имеющимся собственным пяти степеням МК, тем самым имитируя пространственное перемещение реального автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) при работе с подводными объектами. Разработанный стенд обеспечивает:

- ◆ автономную работу МК и ИПА с «рабочими линиями» макета панели ПДК;
- ◆ выход и удержание ИПА относительно установленных целевых точек, определенных системой технического зрения;
- ◆ интеллектуальный анализ состояния рабочих объектов макета панели ПДК и их учет в системе планирования действий;

Как видно, целью данного ИПА является развитие и детальная проработка программно-аппаратных систем, верификация работы этих систем при выполнении реальных задач. Основные задачи, решаемые при помощи ИПА в данной работе, можно сформулировать как:

1. Определение состояния панели и оценка возможности взаимодействия МК с макетом панели ПДК (определение наличия загрязнения, объема и метода (инструментария) необходимой очистки области загрязнения (обрастания)).
2. Выполнение технических работ по очистке загрязненных областей макета панели ПДК.

3. Проведение автономных работ МК с рабочими объектами (hotstab и torque-tool) на макете панели ПДК.

4. Оценка проведенных работ (считывание данных манометров).

5. Обеспечение работ по поиску, определению и забору необходимых образцов конкреций, грунта или иных проб и образцов с их дальнейшим размещением в «контейнере» для хранения.

6. Оценка работы интеллектуальной СТЗ в водной среде с учетом различных условий видимости.

Конструкция имитатора подводного аппарата (ИПА) и архитектура системы автономного управления. Макет панели ПДК выполнен на основе анализа существующих эксплуатируемых ПДК [11, 12] и опыта обслуживания подобных комплексов.

Макет выполненной рабочей панели ПДК и ИПА, а также натурное представлено на рис. 4.

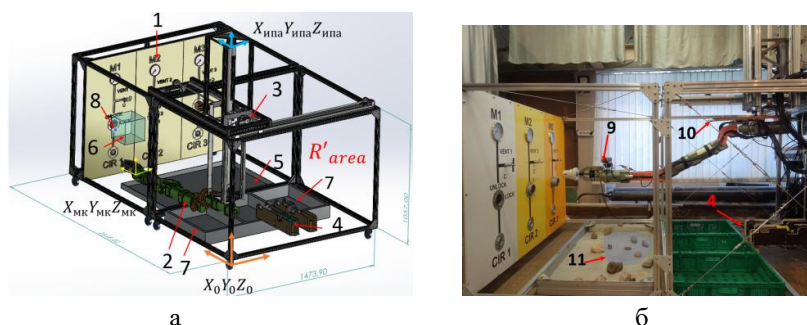


Рис. 4. Макет и натурное представление выполненной рабочей панели ПДК и ИПА

Разработанный стенд представляет из себя быстро сборную каркасную платформу размером 2346 x 1473 x 1057 мм, выполненную из алюминиевых направляющих.

Конструкция ИПА имеет 3 системы координат $X_0Y_0Z_0$ – базовая система координат, $X_{ипа}Y_{ипа}Z_{ипа}$ – система координат ИПА, $X_{МК}Y_{МК}Z_{МК}$ – система координат МК, включающих в себя следующие элементы: 1 – макет панели подводного добывающего комплекса (имеет 3 «рабочих линии», обозначенных как M1, M2 и M3 и выделенных различными цветами). На рабочих линиях присутствуют органы контроля и управления макетом панели (манометр, для отслеживания изменения давления в системе и два разъема для вращательного инструмента с низким крутящим моментом и приемное устройство для штепселя); 2 – подводный электрический пяти степенной манипулятор; 3 – имитатор подводного аппарата; 4 – макетов рабочих инструментов (рабочий штепсель и вращательный инструмент с низким крутящим моментом визуально соответствующих ПНСТ 605-2022 [13]); 5 – поддона (размером 1100·650·90 мм с образцами конкреций).

Также на рис. 4,а,б представлены: 6 – область «окрестности» целевой точки; 7 – поддоны для хранения собранных конкреций; 8 – целевая точка для выхода МК и ИПА; 9 – блок компонентов ИСТЗ на схвате МК в составе (камеры глубины Orbbec Astra Pro, дальномеров ближней (Sharp GP2Y0A41 (4–30 см)) и средней зоны Benewake TFmini Plus LIDAR (12 м); 10 – блок компонентов ИСТЗ на ИПА в составе камеры глубины Intel RealSens D435; 11 – расположение «конкреций». Поток данных с камер глубины может быть представлен в виде двумерных матриц интенсивностей пикселей:

$$V_{x,y}^1 = \{V_{x,y}^1 | x \in [1,1024], y \in [1,1024]\} \quad (1)$$

$$V_{x,y}^2 = \{V_{x,y}^2 | x \in [1,1024], y \in [1,1024]\}. \quad (2)$$

К основным параметрам, описывающим текущее состояние системы МК и ИПА можно отнести:

ИПА способен функционировать при следующих режимах управления:

- ◆ дистанционный режим управления с пульта управления оператора;
- ◆ режим движения по заранее заданным значениям степеней свободы манипуляторного комплекса (по пресетам);

- ♦ автоматизированный режим управления на основе решения обратной задачи кинематики;
- ♦ автономном режиме с использованием интеллектуальной системы технического зрения (ИСТЗ).

Контроль и управление ИПА и МК осуществляется на пункте управления оператора (ПУО). Общая структурная схема комплекса ИПА представлена на рис. 5.

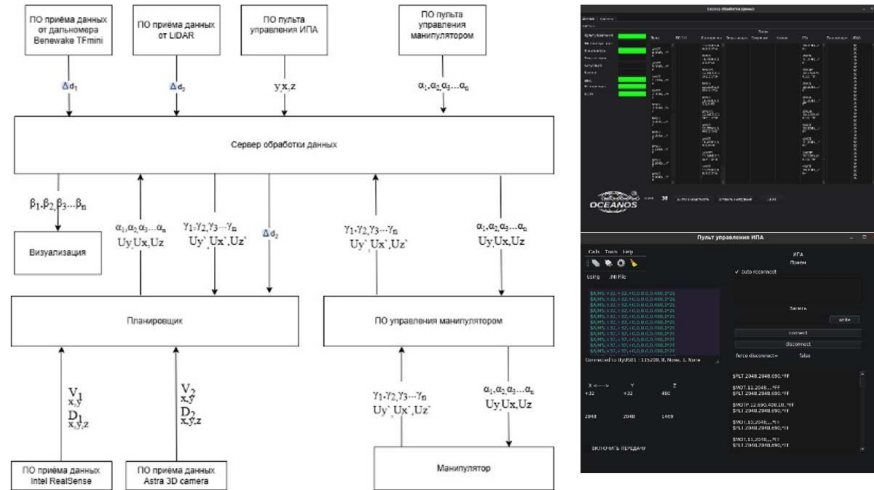


Рис. 5. Общая структурная схема комплекса ИПА и графический интерфейс оператора

ПУО состоит из пульта управления МК и пульта управления ИПА. Оператор имеет возможность настройки скорости перемещения МК и ИПА, что позволяет обеспечить более плавное перемещение объектов управления. Графический интерфейс оператора позволяет производить настройку пресетов, загружать предустановленные миссии, визуализировать положение МК и ИПА в пространстве, выводить диагностическую информацию о состоянии исполнительных механизмов и отображать данные полученные с модулей ИСТЗ. Графический интерфейс оператора представлен на рис. 5. Сервер обработки и маршрутизации данных, обеспечивает дополнительное программно-аппаратное взаимодействие между данными реального ИПА и его цифрового двойника, реализованного при помощи компонентов ROS 2 и визуализации телеметрии.

На рис. 5: U_x, U_y, U_z – значение усилия для трёх направлений движения ИПА в условных единицах; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ – значения усилия на каждую степень манипулятора в условных единицах; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_n$ – количество импульсов посчитанных энкодерами при работе моторов для каждой из степеней манипулятора (каждые 16 импульсов равны одному обороту мотора на 360 градусов); U_x', U_y', U_z' – количество импульсов посчитанных энкодерами при обороте моторов для каждого из направлений движения ИПА; $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n$ – значения углов отклонения каждой из степеней манипулятора

Перевод значений энкодера в углы манипулятора основан выражении

$$V_{\text{angle}} = \frac{V_{\text{enc}} - V_{\text{min}}}{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}} \quad (3)$$

$$\theta = \Delta\theta + V_{\text{angle}} \cdot (\theta_{\text{max}} - \theta_{\text{min}}) + \theta_{\text{min}}, \quad (4)$$

где V_{enc} – текущее значение энкодера; $V_{\text{min}}, V_{\text{max}}$ – минимальные и максимальные значения энкодера; V_{angle} – коэффициент перевода значений энкодера в углы в диапазоне работы звена; θ – вычисленный угол звена манипулятора; $\Delta\theta$ – базовый (смещённый) угол манипулятора (определяется оператором для упреждения возможности выхода за пределы рабочей зоны); $\theta_{\text{min}}, \theta_{\text{max}}$ – минимальный и максимальный углы вращения звена.

Как видно, разработанный ИПА является сложным технологичным комплексом, предназначенным для проработки и исследования алгоритмов планирования движения, детектирования и оценки состояния, а также сопряженного управления МК и ИПА.

Разработка интеллектуальной системы технического зрения (ИСТЗ)

Функции ИСТЗ:

- ◆ определение элементов рабочей панели ПДК и их состояния;
- ◆ определении загрязнений на рабочей панели ПДК;
- ◆ определении координат элементов панели ПДК;
- ◆ определении конкреций и их типа;
- ◆ определение координат конкреций.

Представленный спектр задач решается методами классификации и сегментации искусственными нейронными сетями, совместно с алгоритмами трекинга.

В качестве датасета для обучения были засняты 3200 изображений. В результате аугментации данных (методами геометрических цветовых преобразований, а также использования шумов и искажений) было получено 25000 изображений. Для обучения использовалась Yolo v.8. Нейронная сеть была обучена для определения следующего количества классов $\Phi_{i,k}$ – где i – выбранная рабочая линия, k – объект на панели ($\Phi_{i,1}$ – манометр (подпись), $\Phi_{i,2}$ – манометр, $\Phi_{i,3}$ – вентиль сброса давления (подпись), $\Phi_{i,4}$ – вентиль сброса давления (состояние), $\Phi_{i,5}$ – отверстия для установки инструмента Нт, $\Phi_{i,6}$ – CIR (подпись линии панели), $M_{\Phi_{i,1}}$ – показание манометра (принято 0 или 1, в случае превышения порогового значения $M_{crit} = 1$ Па). Количество эпох обучения 30, размер $batch_size = 20$.

Результат кривых обучения, и работы ИСТЗ по определению объектов на макете рабочей панели представлен на рис. 6.



Рис.6. Результат метрики точности обучения модели (mAP50) и работы ИСТЗ по определению объектов на макете рабочей панели

Результатом работы ИСТЗ является набор центра координат $P_{\Phi_{i,k}} = [x_{\Phi_{i,k}}, y_{\Phi_{i,k}}, z_{\Phi_{i,k}}]$ определенных ИСТЗ объектов на панели. Как видно, в процессе обучения достигнут показатель точности равный 97%. Отдельно сеть обучена определять состояние показателей средств измерений работы линии (манометров).

Разработка системы планирования перемещения МК и ИПА. В основу текущей разработки САУ МК легли результаты, полученные авторами ранее, которые были подробно описаны в работах [10–13] и продемонстрированы при выполнении интервенционных операций в испытательном бассейне СПбГМТУ [14].

Для определения координат схвата МК P_{arm} используется преобразование Денавита-Хартенберга (DH):

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i & 0 & a_i \cos \theta_i \\ -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & \sin \alpha_i & -d_i \sin \alpha_i \\ \sin \alpha_i \sin \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & \cos \alpha_i & d_i \cos \alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где θ_i – угол вращения вокруг оси Z_{i-1} ; d_i – смещение вдоль оси Z_{i-1} ; a_i – длина звена; α_i – угол наклона между Z_{i-1} и Z_i .

В результате выполнения описанных вычислений могут быть получены итоговые матрицы положения для различных систем координат.

В результате могут быть рассчитаны итоговая матрица положения схвата:

$$T_{arm} = T_{UDS1} \cdot T_{UDS2} \cdot T_{UDS3} \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot T_3. \quad (6)$$

где T_{UDS} – матрица преобразования, которая описывает смещение одного звена манипулятора относительно другого; T_i – матрица преобразования, которая описывает смещение одного звена манипулятора относительно другого.

И соответственно координаты схвата:

$$P_{arm} = T_{arm} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Итоговая матрица положения камеры на имитаторе подводного аппарата:

$$T_{realsense} = T_{UDS1} \cdot T_{UDS2} \cdot T_{UDS3} \cdot T_{realsense_tf1} \cdot T_{realsense_tf2} \cdot T_{realsense_tf3}, \quad (8)$$

где $T_{realsense_tf}$ – матрица преобразования, которая описывает смещение камеры относительно имитатора подводного аппарата:

$$T_{astra} = T_{UDS1} \cdot T_{UDS2} \cdot T_{UDS3} \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_{astra_tf1} \cdot T_{astra_tf2} \cdot T_{astra_tf3}. \quad (9)$$

где T_{astra_tf} – матрица преобразования, которая описывает смещение камеры относительно схвата манипулятора.

Решение обратной задачи кинематики манипулятора основано на методе построения обратной матрицы Якоби, которая также позволяет учесть необходимые ограничения заложенные в конструкции ИПА и МК. Ошибка в положении схвата МК может быть представлена выражением:

$$\Delta P = P_{target} - P_{arm}. \quad (10)$$

где $P_{target} = [x_{\Phi_{i,k}}, y_{\Phi_{i,k}}, z_{\Phi_{i,k}}]$ – координаты целевой точки МК определяемые системой СТЗ $(V_{x,y}^1, V_{x,y}^2)$. При работе с инструментами $P_{target} = P_{\Phi_k} = P^y$, где $P_{\Phi_{i,k}}^y = [x_{\Phi_{i,k}}, y_{\Phi_{i,k}}, z_{\Phi_{i,k}} - z_{p_{ндк}}^y]$ – координаты центра окрестности облака целевых точек выхода МК определяющегося на основе нормального закона распределения (в среднем на удалении от панели $z_{p_{ндк}}^y = 0.1$ (м)).

В данном описании результатов итерации решения задачи кинематики МК функция самотестирования и корректировки ΔP автономным МК не раскрывается.

Плавность хода движения схвата к целевой точке осуществляется за счет управления по каналу скорости:

$$Vp = \frac{\|\Delta P\|}{\Delta P} \cdot v_{step}, \quad (11)$$

где v_{step} – коэффициент сходимости равный 0.05 метра.

Для построения Якобиана (J) необходимо найти производные координат по обобщённым координатам:

$$J = \partial q \partial P. \quad (12)$$

Используется псевдообратная матрица J, которая помогает решать уравнения вида $Ax = b$, даже если у матрицы A нет обратной матрицы, находя наилучшее приближение к решению:

$$\Delta Q = J \cdot Vp, \quad (13)$$

где Vp скорость сходимости решения ОЗК схвата.

Обновление углов происходит на основе выражения:

$$Q_{new} = Q_{current} + \Delta Q. \quad (14)$$

Итерации продолжают, пока не станет меньше порогового значения $\|\Delta P\| < 0.02$ м.

Матричное представление рассчитанного якобиана может быть представлено в виде выражений для поступательного (15) и вращательного движения (16)

$$J_{trans_i} = R_i \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$J_{rot_i} = R_i \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times (P_{arm} - P_i), \quad (16)$$

где R_i – матрица поворота из ДН-матрицы, P_{arm} – координаты схвата, P_i – координаты i-й степени МК.

Реализация автономной работы ИПА при выполнении сервисного обслуживания макета панели ПДК. Процесс сервисного обслуживания макета панели ПДК может быть представлен в виде блок-схемы алгоритма на рис. 7.

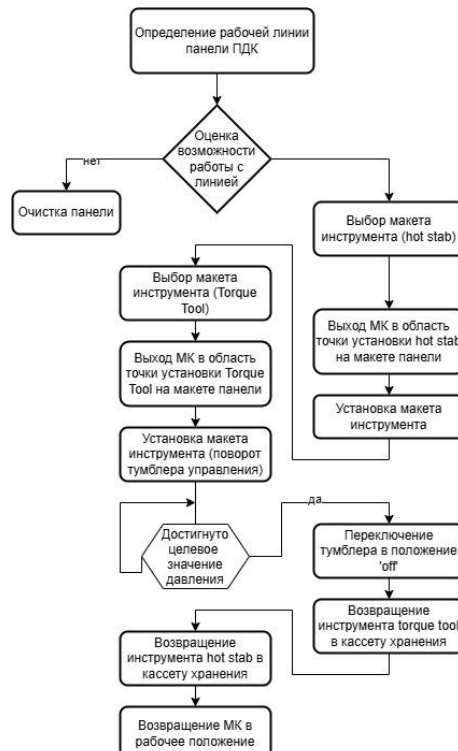


Рис. 7. Блок-схема процесса сервисного обслуживания макета панели ПДК

На первом этапе оператор на ПУО задает целевую миссию, к примеру, «сервисное обслуживание 1 линии макета панели ПДК». МК и ИПА выходят в рабочее положение, из которого видна вся рабочая область макета панели. Происходит определение позиций рабочих объектов на панели $\Phi_{i,k}$ и определение их состояния. Сценарий обслуживания, включает в себя установку рабочего инструмента hot-stab (Ht) (МК забирает инструмент из макета кассеты на основе пресета) в сервисное отверстие на панели. Переход МК и ИПА из рабочего положения в окрестность целевой точки $P_{\Phi_{1,5}}^V$ осуществляется на основе решения обратной задачи кинематики с использованием матрицы Якоби (на данный момент принято допущение, связанное с выбором целевой точки $P_{\Phi_{1,5}}^V$, дальнейшая комплексная проработка, подразумевает работу с оптимизированным облаком целевых точек). Детальное позиционирование относительно объекта $\Phi_{i,k}$ происходит за счет поэтапного смещения ИПА в плоскости XY с учетом нормализации значений $V_{x,y}^2$ в диапазоне $[0,1]$ ($V_{x,y}^{2(norm)}$).

$$X_{dev} = \left| x_{\Phi_{i,k}} - \frac{(V_{x,y}^{2(norm)})}{2} \right|, Y_{dev} = \left| y_{\Phi_{i,k}} - \frac{(V_{x,y}^{2(norm)})}{2} \right|. \quad (17)$$

В случае $X_{dev} < \Delta_{threshold}$, $Y_{dev} < \Delta_{threshold}$ где $\Delta_{threshold} = 0.05$ - минимальное значение ошибки по отклонению от целевого значения, система управления останавливает движение в плоскости XY, считая, что схват МК спозиционирован относительно $P_{\Phi_{1,5}}^V$ в плоскости XY. Отрабатывая смещение камеры схвата (X_{dev}, Y_{dev}) по оси Y и осуществляя перемещение вдоль оси Z на величину (Ω) (зависящую от типа инструмента $\Omega_{Hs} = 0.37$ (м.) для инструмента Hs ; $\Omega_{Tt} = 0.28$ (м.) – для инструмента Tt . Таким образом, когда $\Delta d_1 = \Omega_{Hs}$ и $\Delta d_1 = \Omega_{Tt}$ можно считать, что инструменты Hs и Tt успешно установлены в панели. Пример позиционирования относительно окрестности целевой точки представлен на рис. 8.

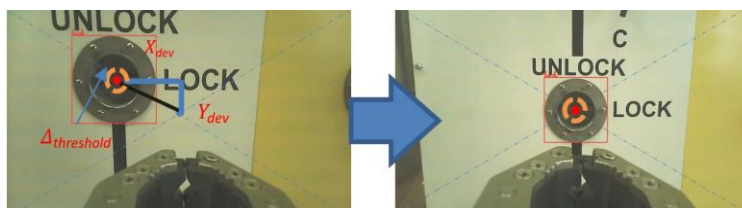


Рис. 8. Пример позиционирования относительно окрестности целевой точки

По аналогичному принципу происходит установка инструмента Tt . После открытия клапана подачи давления система отслеживает изменение состояния манометра $M_{\Phi_{1,1}}$. При достижении M_{crit} $M_{\Phi_{1,1}} = 1$ и система автоматически закрывает клапан подачи давления. Процесс завершения работы с панелью происходит по обратной схеме.

Пример выполнения сценария автономного обслуживания панели представлен на рис. 9 и 10.

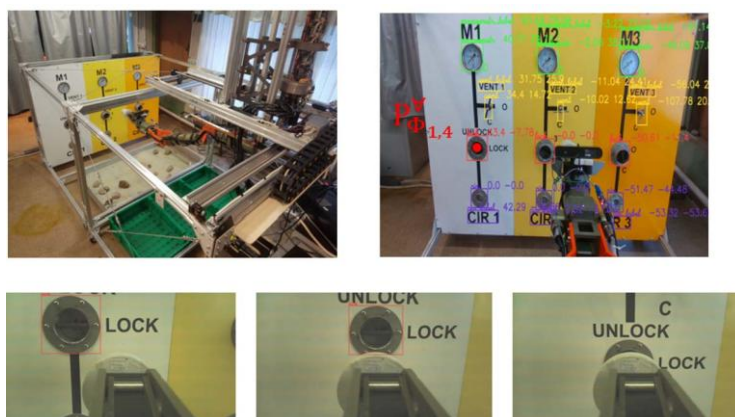


Рис. 9. Пример движения ИПА с МК в окрестность точки установки рабочего инструмента Tt и установка инструмента в посадочное место на панели ПДК

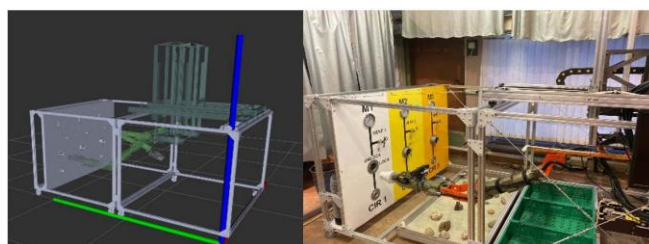


Рис. 10. Пример движения ИПА с МК в комплексе симуляции Gazebo и передвижение на реальном образце ИПА

Графики изменения ошибки перемещения схвата относительно целевой точки представлены на рис. 11.

Реализация автономной работы ИПА при выполнении задачи по сбору конкреции. Для начала обследования области донной поверхности в поисках необходимого типа конкреций, МК и ИПА перемещаются в точку начала поиска

Поиск необходимых конкреций проводится за счет покрытия указанного участка донной поверхности R'_{area} набором точек $P_{R'_{area}} = [P_{R1}, P_{R2} \dots P_{Rn}]$ – где n – количество точек образующих целевую траекторию движения рабочего органа МК (к примеру, в виде галсов). В процессе прохождения ИПА с МК по целевой траектории ИСТЗ при об-

наружении необходимого типа конкреций $K_{tr} = [x_c, y_c]$ обнаруживается центр определенного объекта $K_{tr} = [x_c, y_c]$. На основе выражений (те же что и выше для наведения по камере) САУ ИПА стабилизирует над целевым объектом, так чтобы конкреция находилась в центре изображения. Зная смещение камеры на схвате МК относительно центральной точки самого схвата (dx, dy) происходит перемещение ИПА вдоль осей XYZ на величины (dx, dy) и dz (минимальное расстояние МК от грунта), после чего происходит процесс захвата конкреции. После выполнения забора конкреции, в зависимости ее типа, ИПА и МК располагают ее в определенный контейнер для сбора. Пример выполнения сценария по забору грунта представлен на рис. 12.

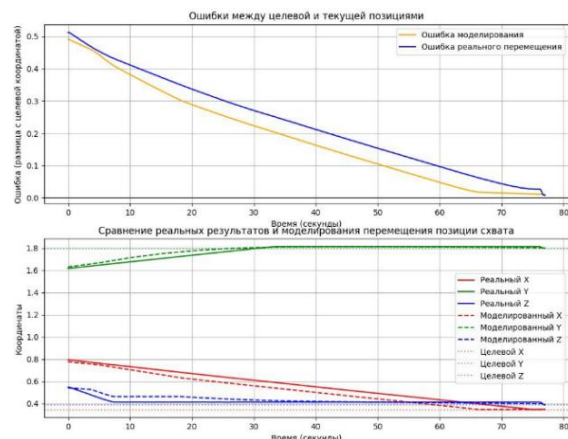


Рис. 11. График перемещения схвата манипулятора и ошибка перемещения относительно целевой точки в сравнении с имитационным моделированием

Сравнение изменения обобщенных координат ИПА и МК с результатами моделирования представлено на рис. 13.

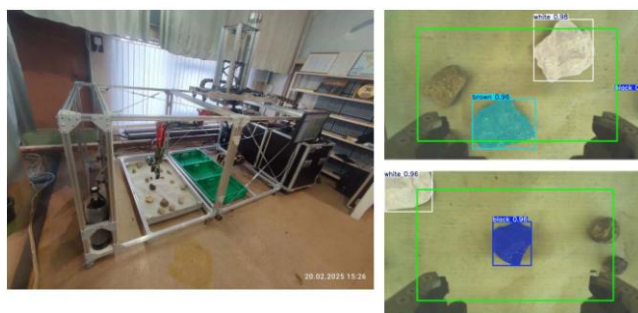


Рис. 12. Пример выполнения сценария детектирования и забора заданной конкреции грунта

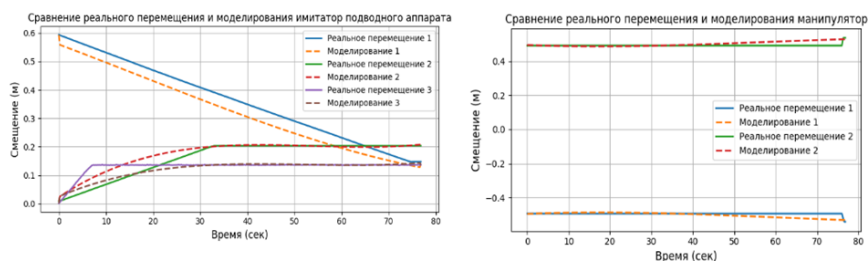


Рис. 13. Перемещение имитатора подводного аппарата и манипулятора относительно целевых обобщенных координат

Заключение. В работе рассмотрен процесс разработки и применения имитатора подводного резидентного аппарата с установленным манипуляторным комплексом. Представлен анализ существующих зарубежных проектов и основных трендов в области резидентной техники. Для решения задач технологического обслуживания панели подводного добычного комплекса использовалась интеллектуальная система технического зрения, целью которой являлось распознавание типов объектов на рабочей панели и их состояния.

Представленные результаты демонстрируют возможность автономной работы МК на основе данных ИСТЗ, что позволяет производить детектирование объектов интереса панели ПДК и заданных конкреций, а также позиционирование относительно этих объектов.

Представленное численное решение обратной задачи кинематики обладает универсальностью, позволяя применять его для различных конфигураций манипуляторных комплексов с учетом их конструктивных ограничений. Использование матрицы Якоби в процессе решения обратной задачи кинематики совместно с решением прямой задачи кинематики для комплекса ИПА и МК обеспечивает не только точный расчет траектории, но и учет существующих механических и геометрических ограничений манипулятора на этапе планирования движения. Благодаря этому путь, заданный в модели, практически совпадает с реальным перемещением робота, что повышает предсказуемость и точность работы системы.

Использование локального планировщика пути на основе данных с камеры на схвате позволяет корректировать перемещение ИПА в процессе перемещения, что значительно повышает точность работы системы в сложных подводных условиях.

Направление дальнейших работ связано с проведением исследований в подводной среде с учетом генерации возмущающих воздействий (турбулентных течений, создаваемых генератором потока) и изменяемых параметров освещенности и мутности подводной среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Carrera A., Carreras M., Kormushev P., Palomeras N. and Naqappa S.* Towards valve turning with an AUV using Learning by Demonstration // 2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen, Bergen, Norway, 2013. – P. 1-7. – DOI: 10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608097.
2. *Palomeras N., Carrera A., Hurtós N. et al.* Toward persistent autonomous intervention in a subsea panel // *Auton Robot.* – 2016. – 40. – P. 1279-1306. – <https://doi.org/10.1007/s10514-015-9511-7>.
3. *Palomeras N., Peñalver A., Massot-Campos M., Negre P.L., Fernández J.J., Ridao P., Sanz P.J., Oliver-Codina G.* I-AUV Docking and Panel Intervention at Sea // *Sensors.* – 2016. – 16, 1673. – <https://doi.org/10.3390/s16101673>.
4. *Palomeras N., Ridao P., Ribas D., and Vallicrosa G.* Autonomous I-AUV docking for fixed-base manipulation // *Proc. IFAC.* – 2014. – Vol. 47, No. 3. – P. 12 160-12 165.
5. *Pi R., Cieślak P., Ridao P. and Sanz P.J.* TWINBOT: Autonomous Underwater Cooperative Transportation // in *IEEE Access.* – 2021. – Vol. 9. – P. 37668-37684. – DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3063669.
6. *Electric Manipulators tested for Offshore Wind O&M by University of Girona.* – <https://reachrobotics.com/blog/electric-manipulators-conduct-ndt-for-offshore-wind-platforms/>.
7. *Cherame Jami, and Alan Anderson.* Developing the Next Generation of Pipeline Inspection AUV // Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 2023. – DOI: <https://doi.org/10.4043/32559-MS>.
8. *Glenn Casey.* Next Generation Building Blocks of an Autonomous Subsea Vehicle // Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 2023. – DOI: <https://doi.org/10.4043/32520-MS>.
9. *Neviso C., Cavallini F., Massari G., Bernini T., Watanabe T., and Britto A.* Going Deeper: Inspecting Subsea Live Assets by Means of an Advanced AUV Solution // Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 2024. – DOI: <https://doi.org/10.4043/35245-MS>.
10. *Пятавин П.А.* Метод автоматической стыковки необитаемых подводных аппаратов с использованием многозвенных манипуляторов // Международный семинар «Навигация и управление движением» (NMC-2023). – С. 57-59.
11. *Юрманов А.П., Панчук М.О., Коноплин А.Ю.* Метод коррекции траекторий рабочего органа многозвеного манипулятора необитаемого подводного аппарата // *Подводные исследования и робототехника.* – 2023. – № 4 (46). – С. 43-51. – https://doi.org/10.37102/1992-4429_2023_46_04_04.
12. *Коноплин А.Ю., Красавин Н.А., Юрманов А.П., Пятавин П.А., Костенко В.В., Быканова А.Ю.* Разработка комплекса методов для автономного выполнения технологических операций манипуляционными подводными аппаратами // *Вестник ДВО РАН.* – 2024. – No. 1. – С. 54-71. – <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824010044>. EDN: leqdse.

13. *Маевский А.М., Занин В.Ю., Кожемякин И.В.* Разработка Комбинированной Системы Управления Резидентным/Интервенционным Анпа На Основании Поведенческих Методов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 1 (211). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-kombinirovannoy-sistemy-upravleniya-rezidentnym-interventsionnym-ampa-na-osnovanii-povedencheskih-metodov> (дата обращения: 09.03.2021).
14. *Chemisky B., Menna F., Nocerino E., Drap P.* Underwater Survey for Oil and Gas Industry: A Review of Close Range Optical Methods // *Remote Sens.* – 2021. – 13, 2789. – <https://doi.org/10.3390/rs13142789>.
15. *Nauert Franka and Kampmann Peter.* Inspection and maintenance of industrial infrastructure with autonomous underwater robots // *Frontiers in Robotics and AI.* – 2023. – 10. – 10.3389/frobt.2023.1240276.
16. ПНСТ 605-2022. Нефтяная и газовая промышленность. Системы подводной добычи. Инструменты телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов и их интерфейсы. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 50 с.
17. *Занин В.Ю., Маевский А.М., Кожемякин И.В. и др.* Использование морской робототехники в задачах оперативной океанографии. Отечественный и зарубежный опыт // *Морские информационно-управляющие системы.* – 2020. – № 1 (17). – С. 94-102. – http://oceanplatform.ru/wp-content/uploads/2020/08/journal_07_2020.
18. *Занин В.Ю., Маевский А.М. и др.* Разработка элементов подводных робототехнических резидентных систем на примере отечественного автономного необитаемого подводного аппарата интервенционного класса и сопутствующих технологий // *Сб. работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа.* – 2019. – С. 18-26. – https://oceanos.ru/s1/files/File/2019_Arctic_residential.pdf.
19. *Маевский А.М., Гайкович Б.А.* Разработка гибридных автономных необитаемых аппаратов для исследования месторождений углеводородов // *Вести газовой науки. Современные подходы и перспективные технологии в проектах освоения нефтегазовых месторождений российского шельфа.* – 2019. – № 2 (39). – С. 30-41.
20. *Маевский А.М., Гайкович Б.А.* Разработка легкого интервенционного автономного необитаемого подводного аппарата в целях использования в подводных резидентных системах // *Матер. XIV Всероссийской научно-практической конференции и X Молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах».* – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 83-98.

REFERENCES

1. *Carrera A., Carreras M., Kormushev P., Palomeras N. and Naqappa S.* Towards valve turning with an AUV using Learning by Demonstration, 2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen, Bergen, Norway, 2013, pp. 1-7. DOI: 10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608097.
2. *Palomeras N., Carrera A., Hurtós N. et al.* Toward persistent autonomous intervention in a subsea panel, *Auton Robot*, 2016, 40, pp. 1279-1306. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10514-015-9511-7>.
3. *Palomeras N., Peñalver A., Massot-Campos M., Negre P.L., Fernández J.J., Ridao P., Sanz P.J., Oliver-Codina G.* I-AUV Docking and Panel Intervention at Sea, *Sensors*, 2016, 16, 1673. Available at: <https://doi.org/10.3390/s16101673>.
4. *Palomeras N., Ridao P., Ribas D., and Vallicrosa G.* Autonomous I-AUV docking for fixed-base manipulation, *Proc. IFAC*, 2014, Vol. 47, No. 3, pp. 12 160-12 165.
5. *Pi R., Cieślak P., Ridao P. and Sanz P.J.* TWINBOT: Autonomous Underwater Cooperative Transportation, in *IEEE Access*, 2021, Vol. 9, pp. 37668-37684. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3063669.
6. Electric Manipulators tested for Offshore Wind O&M by University of Girona. Available at: <https://reachrobotics.com/blog/electric-manipulators-conduct-ndt-for-offshore-wind-platforms/>.
7. *Cheramie Jami, and Alan Anderson.* Developing the Next Generation of Pipeline Inspection AUV, *Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 2023.* DOI: <https://doi.org/10.4043/32559-MS>.
8. *Glenn Casey.* Next Generation Building Blocks of an Autonomous Subsea Vehicle, *Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 2023.* DOI: <https://doi.org/10.4043/32520-MS>.
9. *Nevo C., Cavallini F., Massari G., Bernini T., Watanabe T., and Britto A.* Going Deeper: Inspecting Subsea Live Assets by Means of an Advanced AUV Solution, *Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 2024.* DOI: <https://doi.org/10.4043/35245-MS>.
10. *Pyatavin P.A.* Metod avtomaticheskoy stykovki neobitaemykh podvodnykh apparatov s ispol'zovaniem mnogozvennykh manipulyatorov [Method of automatic docking of unmanned underwater vehicles using multi-link manipulators], *Mezhdunarodnyy seminar «Navigatsiya i upravlenie dvizheniem» (NMC-2023)* [International Seminar "Navigation and Motion Control" (NMC-2023)], pp. 57-59.
11. *Yurmanov A.P., Panchuk M.O., Konoplin A.Yu.* Metod korrektsii traektoriy rabocheho organa mnogozvennogo manipulyatora neobitaemogo podvodnogo apparata [Method of correction of trajectories of the working element of a multi-link manipulator of an unmanned underwater vehicle], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Research and Robotics], 2023, No. 4 (46), pp. 43-51. Available at: https://doi.org/10.37102/1992-4429_2023_46_04_04.

12. Konoplin A.Yu., Krasavin N.A., Yurmanov A.P., Pyatavin P.A., Kostenko V.V., Bykanova A.Yu. Razrabotka kompleksa metodov dlya avtonomnogo vypolneniya tekhnologicheskikh operatsiy manipulyatsionnymi podvodnymi apparatami [Development of a set of methods for autonomous performance of technological operations by underwater manipulation vehicles], *Vestnik DVO RAN* [Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences], 2024, No. 1, pp. 54-71. Available at: <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824010044>. EDN: leqds.
13. Maevskiy A.M., Zanin V.Yu., Kozhemyakin I.V. Razrabotka Kombinirovannoy Sistemy Upravleniya Rezydentnym/Interventsionnym Anpa Na Osnovanii Povedencheskikh Metodov [Development of a Combined Control System for a Resident/Interventional Unmanned Aerial Vehicle Based on Behavioral Methods], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 1 (211). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-kombinirovannoy-sistemy-upravleniya-rezydentnym-interventsionnym-anpa-na-osnovanii-povedencheskikh-metodov> (accessed 09 March 2021).
14. Chemisky B., Menna F., Nocerino E., Drap P. Underwater Survey for Oil and Gas Industry: A Review of Close Range Optical Methods, *Remote Sens*, 2021, 13, 2789. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs13142789>.
15. Nauert Franka and Kampmann Peter. Inspection and maintenance of industrial infrastructure with autonomous underwater robots, *Frontiers in Robotics and AI*, 2023, 10. Available at: [10.3389/frobt.2023.1240276](https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1240276).
16. PNST 605-2022. Neftyanaya i gazovaya promyshlennost'. Sistemy podvodnoy dobychi. Instrumenty teleupravlyayemykh neobitaemykh podvodnykh apparatov i ikh interfeysy [PNST 605-2022. Oil and gas industry. Underwater production systems. Tools of remotely operated unmanned underwater vehicles and their interfaces]. Moscow: Rossiyskiy institut standartizatsii, 2022, 50 p.
17. Zanin V.Yu., Maevskiy A.M., Kozhemyakin I.V. i dr. Ispol'zovanie morskoy robototekhniki v zadachakh operativnoy okeanografii. Otechestvennyy i zarubezhnyy opyt [Use of marine robotics in operational oceanography tasks. Domestic and foreign experience], *Morskie informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Marine information and control systems], 2020, No. 1 (17), pp. 94-102. Available at: http://oceanplatform.ru/wp-content/uploads/2020/08/journal_07_2020.
18. Zanin V.Yu., Maevskiy A.M. i dr. Razrabotka elementov podvodnykh robototekhnicheskikh rezidentnykh sistem na primere otechestvennogo avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata intervetsionnogo klassa i soputstvuyushchikh tekhnologiy [Development of elements of underwater robotic resident systems using the example of a domestic autonomous unmanned underwater vehicle of the intervention class and related technologies], *Sb. rabot laureatov Mezhdunarodnogo konkursa nauchnykh, nauchno-tekhnicheskikh i innovatsionnykh razrabotok, napravlennykh na razvitiye i osvoeniye Arktiki i kontinental'nogo shel'fa* [Collection of works of laureates of the International Competition of Scientific, Scientific-Technical and Innovative Developments Aimed at the Development and Exploitation of the Arctic and the Continental Shelf], 2019, pp. 18-26. Available at: https://oceanos.ru/s1/files/File/2019_Arctic_residential.pdf.
19. Maevskiy A.M., Gaykovich B.A. Razrabotka gibridnykh avtonomnykh neobitaemykh apparatov dlya issledovaniya mestorozhdeniy uglevodorodov [Development of hybrid autonomous unmanned vehicles for exploration of hydrocarbon deposits], *Vesti gazovoy nauki. Sovremennyye podkhody i perspektivnyye tekhnologii v proektakh osvoeniya neftegazovykh mestorozhdeniy rossiyskogo shel'fa* [News of gas science. Modern approaches and promising technologies in projects for development of oil and gas fields of the Russian shelf], 2019, No. 2 (39), pp. 30-41.
20. Maevskiy A.M., Gaykovich B.A. Razrabotka legkogo intervetsionnogo avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata v tselyakh ispol'zovaniya v podvodnykh rezidentnykh sistemakh [Development of a light intervention autonomous unmanned underwater vehicle for use in underwater resident systems], *Mater. XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i X Molodezhnoy shkoly-seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Proceedings of the XIV All-Russian scientific and practical conference and the X Youth school-seminar "Management and processing of information in technical systems"]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, pp. 83-98.

Маевский Андрей Михайлович – АО «НПП ПТ «Океанос»; e-mail: maevskiy_andrey@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; к.т.н., н.с.; начальник отдела морской робототехники СПбГМТУ.

Печайко Иван Александрович – АО «НПП ПТ «Океанос»; e-mail: pechaikojohn@gmail.com; г. Санкт-Петербург, Россия; инженер-робототехник

Алексеев Михаил Александрович – АО «НПП ПТ «Океанос»; e-mail: miho23@bk.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; инженер-программист

Буров Никита Михайлович – ГУАП; e-mail: burov.nm@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; студент.

Maevsky Andrey Mikhailovich – Oceanos JSC; e-mail: maevskiy_andrey@mail.ru; Saint Petersburg, Russia; cand. of eng. sc.; researcher; head of Marine Department SMTU.

Pechayko Ivan Aleksandrovich – Oceanos JSC; e-mail: pechaikojohn@gmail.com; Saint Petersburg, Russia; robotics engineer.

Alekseev Michail Aleksandrovich – Oceanos JSC; e-mail: miho23@bk.ru; Saint Petersburg, Russia; engineer programmer.

Burov Nikita Mikhailovich – SUAI; e-mail: burov.nm@yandex.ru; Saint Petersburg, Russia; student.

УДК 007:621.865.8

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-96-108

В.П. Носков, Ю.С. Баричев, О.П. Гойдин, А.Н. Курьянов

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ ВИДЕО-ДАЛЬНОМЕТРИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ РОБОТОВ ВОЗДУШНОГО И НАЗЕМНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Работа посвящена решению актуальных задач совместной автономной видеонавигации роботов воздушного и наземного применения в наиболее востребованных для проведения специальных операций урбанизированных средах, включающих плотную городскую застройку и здания, где применение традиционных средств дистанционного управления ограничено наличием экранированных зон. Задачи групповой навигации предлагается решать на основе данных бортовых систем технического зрения в процессе оперативной разведки рабочей зоны беспилотным летательным аппаратом, результаты которой обеспечивают автономные движение и полет, как отдельных гетерогенных робототехнических средств, так и в группе. В основу алгоритмов навигации положены методы выделения из объемного облака точек, формируемого бортовым лидаром, опорной горизонтальной поверхности и горизонтальных сечений внешней среды, позволяющих с высокой точностью и быстротой определять все шесть координат объекта управления. Рассмотрены случаи, обусловленные возможными характеристиками внешней среды, когда навигационная задача решается не полностью, и предложены методы их исключения путем дополнения дальнометрических данных лидара видеоданными телекамеры. Приведена оценка точности решения задач видеонавигации, полученная путем математического моделирования внешней среды и формирования видеоданных. Предложены методы снижения ошибки видеонавигации, основанные на использовании специально банка опорных изображений с известными координатами их формирования, позволяющие обеспечить безопасные автономные полет и движение робототехнических средств в урбанизированной среде. Эффективность используемых методов и предлагаемых алгоритмов видеонавигации подтверждается результатами экспериментальных исследований соответствующих программно-аппаратных средств в реальных урбанизированных средах.

Беспилотный летательный аппарат; наземный транспортный робот; система технического зрения; лидар; телекамера; видео-дальнометрическое изображение; навигационная задача; математическое моделирование; ошибка решения навигационной задачи.

V.P. Noskov, Y.S. Barichev, O.P. Goydin, A.N. Kuryanov

DEVELOPMENT AND ANALYSE VISUAL NAVIGATION SYSTEM FOR AIR AND GROUND-BASED ROBOTS

The work is devoted to solving urgent problems of joint autonomous visual navigation for air and ground-based robots in urbanized environments. These environments are highly demanded for special operations, including dense urban areas and buildings, where the use of traditional remote control devices is limited due to the presence of shielded areas. The proposed solution addresses group navigation tasks based on data from onboard vision systems during operational reconnaissance of the working area by an unmanned aerial vehicle (UAV). The results of this reconnaissance enable autonomous movement and flight, both for individual heterogeneous robotic systems and for groups. The navigation algorithms are based on methods for extracting a horizontal reference surface and horizontal sections of the external environment from a volumetric point cloud generated by an onboard lidar. These methods allow for the precise and rapid determination of all six coordinates of the control object. Cases where the navigation task cannot be fully solved due to specific environmental characteristics are also considered. To address

these challenges, methods are proposed to enhance lidar rangefinding data by integrating video camera data. An accuracy assessment of the video navigation solutions is provided, obtained through mathematical modeling of the external environment and the generation of video data. To ensure safe autonomous flight and movement of robotic systems in urban environments, methods for reducing video navigation errors are proposed. These methods utilize a specially designed bank of reference images with known coordinates of their formation. The effectiveness of the applied methods and the proposed video navigation algorithms is confirmed by experimental studies of the corresponding software and hardware in real urbanized environments.

Unmanned aerial vehicle (UAV); ground transport robot; visual navigation; lidar; TV camera; RGB-D image; navigation; mathematical modeling; navigation errors.

Введение. Подавляющее число специальных операций с использованием робототехнических средств проводится в индустриально-городских средах (промышленные предприятия, вокзалы, торгово-развлекательные комплексы, городская застройка, ...). В данных условиях в следствие плотной застройки и наличия экранированных зон, обуславливающих ненадежную работу средств дистанционного управления, остро востребовано согласованное групповое применение автономных воздушных и наземных роботов. При этом вначале роботы воздушного применения должны оперативно формировать данные о рабочей зоне, необходимые для автономной навигации как роботов воздушного, так и наземных применения. Поэтому актуальность создания средств согласованной автономной навигации, позволяющих организовать групповое управления гетерогенными роботами воздушного и наземного применения в урбанизированной среде, не вызывает сомнений [1–3].

Постановка и решение задачи автономной видеонавигации. Как показывает практика [3–12], для определения текущих координат робототехнических средств воздушного и наземного применения наиболее перспективными являются видеонавигационные системы. Задача видеонавигации в рассматриваемом случае может быть успешно решена в два этапа на основе 3D-дальнометрических данных (облаков точек) бортового лидара на бортовом компьютере с достаточной для обеспечения автономного полета беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) вертолетного типа и движения наземных робототехнических комплексов (РТК) точностью и быстродействием [3].

На первом этапе из любого k -го облака точек

$$w_k = \{v_{ki} = \langle x_{ki}, y_{ki}, z_{ki} \rangle\}, \quad (1)$$

$$k=1, 2, \dots, K, i=1, 2, \dots, n,$$

где K – число циклов снятия дальнометрических изображений; n – число точек в облаке; формируемого бортовым лидаром в процессе полета БПЛА, выделяется плоскость [4–6] горизонтальной опорной поверхности

$$x \cdot \cos(\alpha_k) + y \cdot \cos(\beta_k) + z \cdot \cos(\gamma_k) = \rho_k, \quad (2)$$

которая практически всегда имеется в урбанизированной среде (пол, дорога, тротуар, ...). По параметрам горизонтальной плоскости (2) для точки съема k -го дальнометрического изображения определяются абсолютные координаты высоты полета (H_k), крена (Θ_k) и тангажа (γ_k) БПЛА:

$$\begin{cases} H_k = \rho_k, \\ \Theta_k = -\left(\frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{\cos(\alpha_k)}{\sin(\beta_k)}\right)\right), \\ \gamma_k = -\left(\frac{\pi}{2} - \beta_k\right) \end{cases} \quad (3)$$

Затем из исходного облака точек (1) формируется облако точек W_k , приведенное к местной вертикали:

$$\begin{cases} W_k = \{V_{ki} = \langle X_{ki}, Y_{ki}, Z_{ki} \rangle\}, \\ V_{ki} = A(\Theta_k, \gamma_k) \times v_{ki}, \\ i = 1, 2, \dots, n, \end{cases} \quad (4)$$

где $A(\Theta_k, \gamma_k)$ – обобщенная матрица поворотов на углы крена Θ_k и тангажа γ_k , вычисленных в соответствии с выражением (3).

Пример выделения горизонтальной плоскости P опорной поверхности из облака точек и определения координат H , Θ и γ в здании приведен на рис. 1.

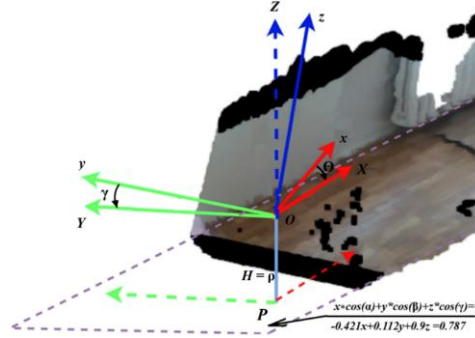


Рис. 1. Выделение опорной горизонтальной плоскости и определение высоты, крена и тангажа БПЛА в точке съема дальнометрического изображения

На втором этапе с учетом данных первого этапа в двух соседних взаимно пересекающихся и приведенных к местной вертикали в соответствии с выражением (4) облаках точек $W_{(k-1)}$ и W_k выделяются горизонтальные сечения $G_{(k-1)}(h)$ и $G_k(h)$ (горизонтальные 2D-дальнометрические изображения) на одной высоте h от опорной поверхности:

$$\begin{cases} V_{(k-1)i} \in G_{(k-1)}(h), & \text{если } Z_{(k-1)i} = (h - \rho_{(k-1)}) \pm \delta, \\ V_{ki} \in G_k(h), & \text{если } Z_{ki} = (h - \rho_k) \pm \delta, \end{cases} \quad (5)$$

$$i=1, 2, \dots, n,$$

где n – число точек в облаке; δ – интервал разброса измерений лидара, определяемый такими его характеристиками, как точность и подробность формируемых 3D-изображений.

По 2D-дальнометрическим изображениям $G_{(k-1)}(h)$ и $G_k(h)$, выделенным в соответствии с выражением (5), на k -м цикле видеонавигации находится перемещение БПЛА между $(k-1)$ -м и k -м положениями съема изображений в системе координат $(k-1)$ -го положения на основе решения задачи оптимизации – задачи поиска глобального минимума целевой функции ($\Gamma_{(k-1)k}$) разности этих изображений на множестве возможных значений вектора приращений координат $\langle \Delta X_{(k-1)k}, \Delta Y_{(k-1)k}, \Delta \varphi_{(k-1)k} \rangle$ [7–10]:

$$\Gamma_{(k-1)k}(\Delta X_{(k-1)k}, \Delta Y_{(k-1)k}, \Delta \varphi_{(k-1)k}) = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta d_i * c_i}{\sum_{i=1}^n c_i}, \quad (6)$$

где Δd_i – модуль разницы между i -м вектором ($V_{(k)i}$) из $G_k(h)$ и соответствующим ему по направлению вектором из $G_{(k-1)}(h)$ при условии, что выполнено перемещение $\langle \Delta X_{(k-1)k}, \Delta Y_{(k-1)k}, \Delta \varphi_{(k-1)k} \rangle$; $c_i \in \{0, 1\}$ ($c_i = 1$, если для i -го измерения из $G_k(h)$ существует соответствующее по направлению измерение из $G_{(k-1)}(h)$ при условии, что выполнено перемещение $\langle \Delta X_{(k-1)k}, \Delta Y_{(k-1)k}, \Delta \varphi_{(k-1)k} \rangle$, и $c_i = 0$ – в противном случае).

Процесс определения приращения координат $\langle \Delta Y_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta \varphi_{12} \rangle$ между двумя точками съема (O_1, O_2) изображений в реальной урбанизированной среде с плотной городской застройкой приведен на рис. 2.

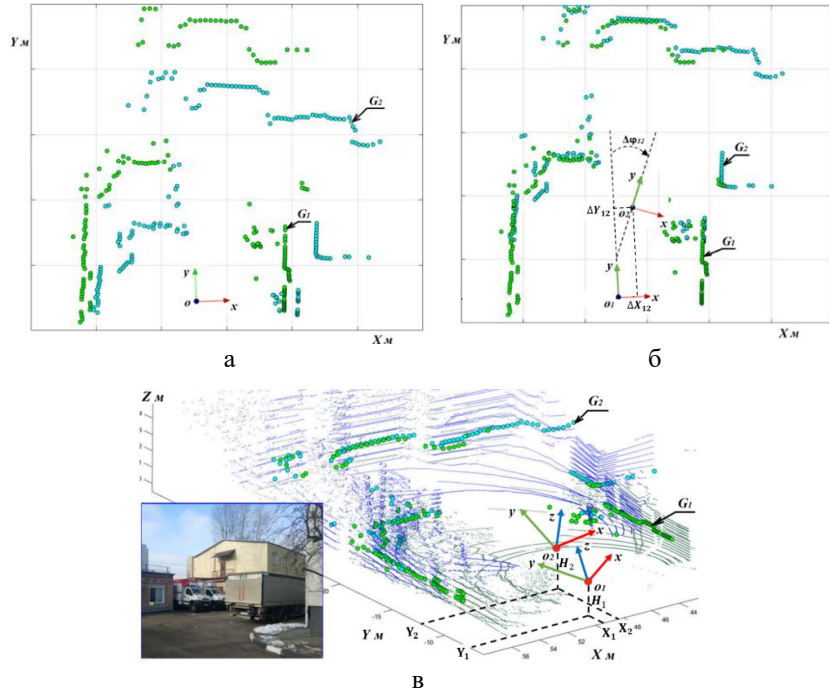


Рис. 2. Процесс определения приращения координат $\langle \Delta Y_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta \phi_{12} \rangle$:
а – сечения G_1 и G_2 в системе координат бортового лидара; б – совмещение сечений
в системе координат первого положения; в – сечения G_1 и G_2 и положения БПЛА
в рабочей зоне

На основе найденных на каждом k -м цикле видеонавигации приращений координат вычисляются остальные три координаты – две линейные координаты горизонтального положения (X_k, Y_k) и курсового угла (ϕ_k):

$$\begin{cases} X_k \\ Y_k \\ \phi_k \end{cases} = \begin{cases} X_0 \\ Y_0 \end{cases} + \sum_{m=1}^k \begin{vmatrix} \cos(\phi_{(m-1)}) & -\sin(\phi_{(m-1)}) \\ \sin(\phi_{(m-1)}) & \cos(\phi_{(m-1)}) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \Delta X_{(m-1)m}^0 \\ \Delta Y_{(m-1)m}^0 \end{vmatrix}, \\ \phi_0 + \sum_{m=1}^k \Delta \phi_{(m-1)m}^0, \end{cases} \quad (7)$$

где X_0, Y_0, ϕ_0 – значения координат в точке старта; m – номер цикла видеонавигации ($m = 1, 2, \dots, k$); $\langle \Delta X_{(m-1)m}^0, \Delta Y_{(m-1)m}^0, \Delta \phi_{(m-1)m}^0 \rangle$ – значение вектора приращения координат в точке глобального минимума целевой функции $\Gamma_{(m-1)m}$.

Таким образом решается полная задача навигации – определяются все шесть координат $\langle X_k, Y_k, Z_k, \phi_k, \theta_k, \gamma_k \rangle$ в каждой точке съема изображений.

В подавляющем числе случаев геометрия горизонтальных 2D-дальнометрических изображений реальных рабочих зон урбанизированной среды (помещения, цеха, вокзалы, плотная городская застройка, ...) такова, что позволяет, используя выражения (3) и (7), корректно решить полную навигационную задачу только по дальнометрическим изображениям, хотя могут быть и исключения. Например, когда в рабочей зоне кроме опорной горизонтальной поверхности есть только одна ровная вертикальная плоскость (рис. 3,а) или только две ровные параллельные вертикальные плоскости (одна стена или две стены коридора).

В этих случаях целевая функция (6) имеет форму типа “оврага” равной глубины и не имеет единственного глобального минимума (рис. 3,в), однако, любой из них однозначно определяет искомое приращение курса, т.к. находится в плоскости трехмерной области определения целевой функции, соответствующей искомому приращению координаты $\Delta \phi_{(k-1)k}^0$ (рис. 3,б), а приращения двух оставшихся линейных координат $(\Delta X_{(k-1)k}, \Delta Y_{(k-1)k})$ связываются линейной зависимостью (рис. 3,а,в).

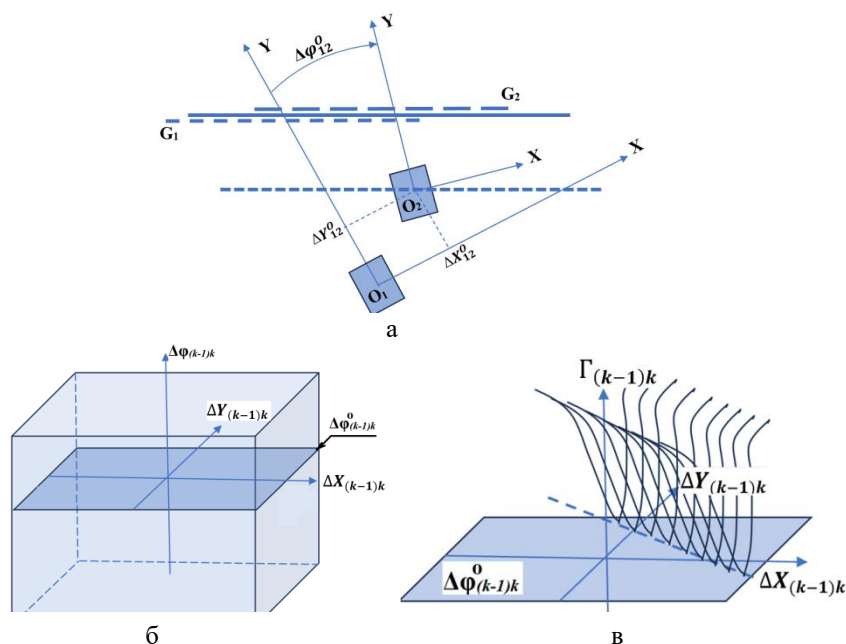


Рис. 3. Случай, когда задача экстремальной навигации не имеет единственного решения:
 а – формирование горизонтальных 2D-изображений G_1 и G_2 стены; б – область определения целевой функции; в – двухмерное сечение целевой функции в точках решения

Чтобы исключить неоднозначность решения задачи оптимизации в рассмотренном случае, необходимо использовать дополнительные данные о внешней среде, например, видеоданные, получаемые видеокамерой, и формировать комплексированное (видео-дальнометрическое) изображение сцены [11]. На рис. 4,а,б приведены два комплексированных 3D-изображения вертикальной стены, полученные из двух разных положений лидара с выделенными на них горизонтальными комплексированными 2D-изображениями G_1 и G_2 .

На рис. 4,в,г приведены соответствующие распределения яркостей на изображениях G_1 и G_2 , которые могут быть использованы при их совмещении также путем решения задачи оптимизации – минимизации целевой функции их цвето-яркостной разности [12].

Более рационально для совмещения G_1 и G_2 использовать не все распределение яркостей, а только отдельные особые точки этих комплексированных 2D-изображений – дескрипторы, представляющие собой особые наиболее контрастные точки с локальным индивидуальным распределением яркости [13–15], выделение которых в рассматриваемом случае не вызывает затруднений. На рис. 5,а,б приведены изображения G_1 и G_{12} с выделенными на них дескрипторами D_{11} , D_{12} , D_{13} и D_{21} (дескрипторы D_{11} и D_{21} , выделенные в разных изображениях, соответствуют друг другу).

Если в G_1 и G_2 выделено не менее двух пар соответствующих друг другу дескрипторов, то совмещение G_1 и G_2 достигается автоматически путем совмещения соответствующих друг другу дескрипторов. Если в G_1 и G_2 выделена только одна пара соответствующих друг другу дескрипторов, например, D_{11} и D_{21} , как показано на рис. 5,в, то совмещение G_1 и G_2 достаточно просто достигается путем вращения G_2 вокруг дескриптора D_{11} (D_{21}) до совмещения с G_1 .

В случае отсутствия текстуры в горизонтальных 2D-изображениях или отсутствия самих горизонтальных 2D-изображений G_1 и G_2 (такое возможно при однотонной раскраске вертикальных объектов или при их отсутствии, например, при полете в открытом пространстве), можно использовать текстуру выделенной опорной горизонтальной поверхности [12]. В этом случае решение полной навигационной задачи для двух соседних пересекающихся комплексированных изображений будет следующим.

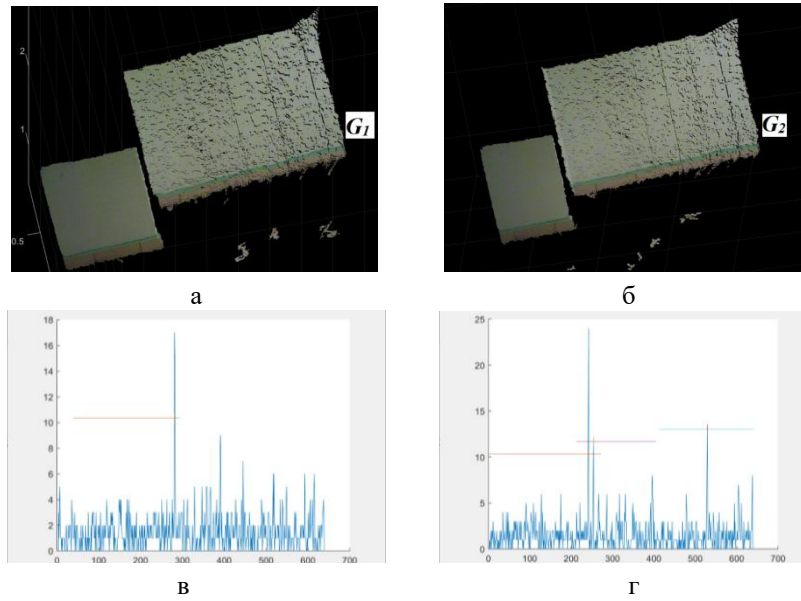


Рис. 4. Два комплексированных изображения: а – 1-е комплексированное 2D-изображение (G_1); б – 2-е комплексированное 2D-изображение (G_2); в – распределение яркостей на 1-м 2D-изображении; г – распределение яркостей на 2-м 2D-изображении

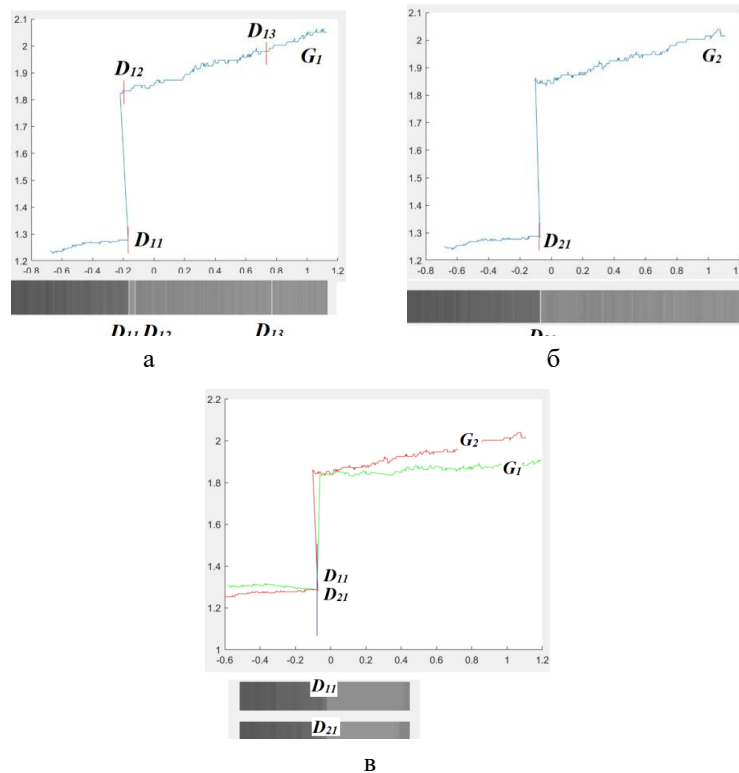


Рис. 5. Использование дескрипторов для совмещения 2D-изображений: а – 1-е 2D-изображение G_1 с выделенными дескрипторами D_{11} , D_{12} и D_{13} ; б – 2-е 2D-изображение G_2 с выделенным дескриптором D_{21} ; в – совмещение 2D-изображений по одноименным дескрипторам D_{11} и D_{21}

Сначала для каждого облака точек w_1 и w_2 (1) определяются уравнения горизонтальной опорной поверхности (2):

$$\begin{cases} P: X \cos(\alpha_1) + Y \cos(\beta_1) + Z \cos(\gamma_1), \\ p: x \cos(\alpha_2) + y \cos(\beta_2) + z \cos(\gamma_2), \end{cases}$$

что позволяет определить высоту, крен и тангаж (3) БПЛА в точках съема изображений (O_1 , O_2), привести исходные изображения к местной вертикали (4) и совместить плоскость p с плоскостью P (рис. 6).

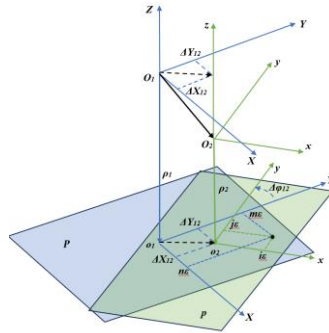


Рис. 6. Совмещение текстур горизонтальной опорной поверхности, снятой из двух разных положений

Приращение остальных трех координат (ΔX_{12} , ΔY_{12} , $\Delta \varphi_{12}$) можно найти путем совмещения текстур плоскостей P и p , решая задачу оптимизации – задачу поиска глобального минимума целевой функции (T_{12}) разности текстур плоскостей P и p на множестве возможных значений вектора $\langle \Delta X_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta \varphi_{12} \rangle$:

$$T_{12}(\Delta X_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta \varphi_{12}) = \frac{\sum_i \sum_j |e_{ij} - E_{mn}| c_{ij}}{\sum_i \sum_j c_{ij}}, \quad (8)$$

где e_{ij} – яркость пиксела из текстуры плоскости p ; E_{mn} – яркость пиксела из текстуры плоскости P , индексы которого вычислены в соответствии с выражением (9); i, j и m, n – дискретные координаты пикселей из текстур p и P соответственно; $c_{ij} \in \{0, 1\}$ – бинарное число, принимающее значение 1, если для пиксела e_{ij} из текстуры плоскости p существует пиксел E_{mn} из текстуры плоскости P , и принимающее значение 0 в противном случае.

$$\begin{bmatrix} m * \varepsilon \\ n * \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{12} \\ \Delta Y_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\Delta \varphi_{12}) & \sin(\Delta \varphi_{12}) \\ -\sin(\Delta \varphi_{12}) & \cos(\Delta \varphi_{12}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i * \varepsilon \\ j * \varepsilon \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где ε – линейный размер пиксела.

Результат определения приращения координат $\langle \Delta X_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta \varphi_{12} \rangle$ между двумя точками (O_1 , O_2) съема комплексированных изображений при использовании текстуры опорной поверхности в здании приведен на рис. 7.

В рассматриваемом случае более рационально для совмещения текстур P и p также использовать не все распределение яркостей, а только отдельные особые точки текстуры – дескрипторы, например, инвариантные к перемещениям и масштабу SIFT-дескрипторы [13–15]. При выделении из текстуры таких дескрипторов требуется выполнить большой объем вычислений для построения пирамид гаусианов и разностей гаусианов при разных масштабах изображений. Поэтому целесообразно использовать сразу инвариантные к перемещениям и масштабу комплексированные (видео-дальнометрические) дескрипторы, выделяемые из комплексированных изображений [16], в нашем случае – плоские дескрипторы $\vec{D} \in P$ и $\vec{d} \in p$, полученные соответственно из текстур плоской опорной поверхности, выделенных из первого и второго изображений (рис. 8).

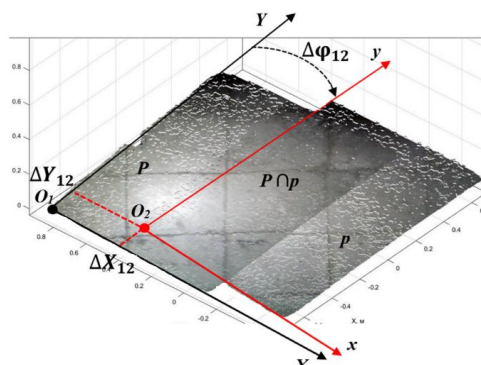


Рис. 7. Определения приращения координат $\langle \Delta X_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta \varphi_{12} \rangle$ с использованием текстуры опорной поверхности

Совмещение одной пары, соответствующих друг другу плоских комплексированных дескрипторов

$$\begin{cases} \vec{D} = \langle X_D, Y_D, \xi_D, N_D \rangle, \\ \vec{d} = \langle x_d, y_d, \xi_d, n_d \rangle, \end{cases}$$

где $\langle X_D, Y_D \rangle$ и $\langle x_d, y_d \rangle$ – линейные координаты дескрипторов в соответствующих текстурированных плоскостях; ξ_D и ξ_d – ориентация градиентов перепада яркости дескрипторов; N_D и n_d – нормали к дескрипторам; однозначно определяет искомые приращения координат $\langle \Delta X_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta \varphi_{12} \rangle$.

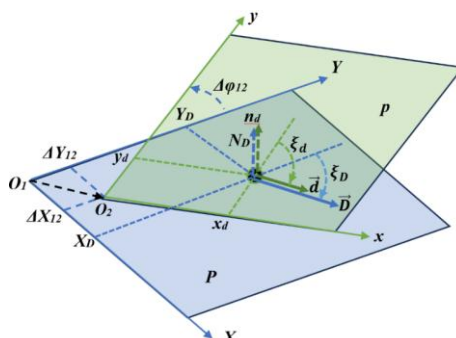


Рис. 8. Совмещение соответствующих друг другу плоских дескрипторов горизонтальной опорной поверхности, снятой из двух разных положений

Нормали N_D и n_d плоских дескрипторов совпадают с нормалью к плоскости опорной поверхности и вычислять их в рассматриваемом плоском случае не требуется.

При большем количестве пар соответствующих друг другу дескрипторов точность решения навигационной задачи возрастает, так как достаточно только совместить особые точки соответствующих друг другу дескрипторов и не нужно использовать ориентацию их градиентов перепада яркости, которая обычно вычисляется с меньшей точностью, чем их координаты [16].

Результат определения приращения координат $\langle \Delta X_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta \varphi_{12} \rangle$ между двумя точками съема изображений при использовании плоских комплексированных дескрипторов опорной поверхности на улице приведен на рис. 9 (зеленым цветом показаны соответствующие друг другу и совмещенные друг с другом дескрипторы, выделенные в пересечении $P \cap p$ текстур опорной поверхности).

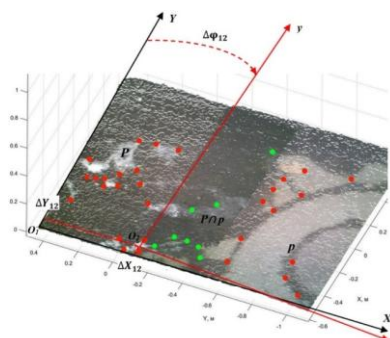


Рис. 9. Определения приращения координат $\langle \Delta Y_{12}, \Delta X_{12}, \Delta \varphi_{12} \rangle$ с использованием комплексированных дескрипторов опорной поверхности

Оценка точности и быстродействия средств видеонавигации. При выборе алгоритмов и средств видеонавигации необходимо оценить их точность и быстродействие в зависимости от предполагаемого состава и характеристик программно-алгоритмических и аппаратных средств, а также от условий их использования в различных средах. Как показал опыт создания и использования достаточно широкого спектра средств видеонавигации в различных средах [3–12, 16, 17], предварительную оценку их эффективности, отладку и исследование с выбором характеристик видео-сенсоров СТЗ, целесообразно выполнять методами математического моделирования [17]. В настоящее время известны стандартные программы математического моделирования геометрии и текстуры внешней среды и процесса формирования исходных видеоданных (телевизионных и дальнометрических изображений) для произвольного положения и ориентации виртуального сенсора с заданными характеристиками, например, GAZEBO [18] – симулятор для работы в среде ROS [19, 20]. В настоящем исследовании использовались, как стандартные библиотеки программ, так и программные средства собственной разработки, позволяющие формировать модели внешних сред и их видео-дальнометрические изображения.

Для сравнения всех рассмотренных выше алгоритмов и созданных соответствующих программно-аппаратных средств видеонавигации на рис. 10 приведены полученные зависимости линейных $\delta \Delta l$ ($\delta \Delta l = \sqrt{\delta \Delta X^2 + \delta \Delta Y^2 + \delta \Delta Z^2}$) и угловых $\delta \Delta \Omega$ ($\Delta \Omega$ – обобщенное вращение на угол соответствующего кватерниона) ошибок одного цикла решения навигационной задачи от ошибки измерения дальности лидара $\delta \Delta d$. На рис. 10 цифрой 1 отмечены зависимости для видеонавигации по 2D-изображениям, 2 – по 3D-изображениям, 3 – с использованием выделяемых плоских объектов и 4 – с использованием комплексированных дескрипторов. При проведении данных исследований получены также оценки быстродействия созданных программно-аппаратных средств.

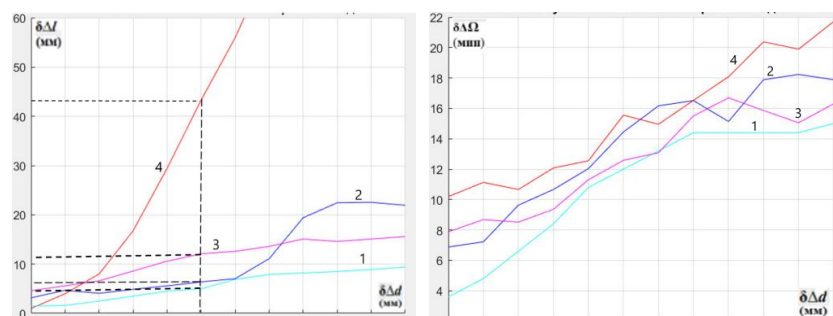


Рис. 10. Зависимости ошибок решения задач навигации от ошибки измерений дальности лидара: а – зависимости ошибок вычисления линейных перемещений; б – зависимости ошибок вычисления угловых перемещений

Полученные зависимости позволяют выбрать комбинацию алгоритмов, обеспечивающую наиболее эффективное решение навигационной задачи. Например, из рис. 10 видно, что при точности измерения дальности 50 мм (соответствует паспортным данным большинства промышленных образцов лидаров) можно быстро решить навигационную с использованием комплексированных дескрипторов (зависимость 4) с точностью не хуже 45 мм. Такой результат гарантирует попадание в интервал унимодальности оптимизируемых целевых функций (6) или (8) при решении задачи экстремальной навигации по 2D- и 3D-изображениям (зависимости 1 и 2) или с использованием текстуры выделяемой опорной поверхности (зависимость 3) и обеспечивает нахождение глобального оптимума прямым спуском соответственно с точностями не хуже 5 и 6 мм или 13 мм. Результаты математического моделирования позволяют также выбрать и такие параметры сенсоров, как углы обзора и плотность сканирования в зависимости от характеристик рабочей зоны.

Суммарная ошибка определения координат растет с ростом числа циклов видеонавигации и может принять неприемлемые значения. Сбрасывание суммарной ошибки обеспечивает метод опорных изображений [6], который применим только для заранее исследованных сред, когда имеется банк изображений внешней среды с известными координатами точек их съема. Для неизвестных заранее сред снижение суммарной ошибки может дать модификация данного метода, если в качестве опорного брать более «старое» изображение, имеющее с текущим изображением непустое пересечение зон обзора. Смещение между положениями сенсора при формировании опорного и текущего изображения может быть значительно больше интервала унимодальности, но выполненное сначала вычисление координат по последовательности соседних изображений гарантирует попадание в интервал унимодальности вокруг точки глобального минимума целевых функций (6) и (8) разности опорного и текущего изображения и обеспечивает тем самым нахождение глобального минимума прямым спуском. Выполнение описанной процедуры позволяет обнулить суммарную ошибку, которая пропорциональна числу снятых изображений между опорным и текущим изображениями, и заменить ее на ошибку одного цикла навигации по опорному и текущему изображениям. Критерием выбора более «старого» изображения в качестве опорного является достаточная площадь пересечения зон обзора (число общих точек двух анализируемых изображений) и значение глобального минимума целевой функции разности изображений, которое растет с уменьшением площади пересечения изображений и косвенно характеризует ошибку данного цикла экстремальной навигации.

Построение модели рабочей зоны наземного РТК. Для построения модели внешней среды, в которой можно планировать траектории движения наземных РТК, необходимо построить объединение

$$W_o = \bigcup_{k=0}^K W_{ok},$$

попавших в зону обзора бортовой СТЗ БПЛА фрагментов W_{ok} горизонтальной опорной поверхности (2), выделяемой на каждом k -м цикле навигации БПЛА:

$$V_{ki} \in W_{ok}, \text{ если } Z_{ki} = -H_k \pm \delta,$$

где $V_{ki} = \langle X_{ki}, Y_{ki}, Z_{ki} \rangle$ – вектор из множества облака точек, приведенного к местной вертикали W_k (4); H_k – высота полета БПЛА (3); δ – интервал разброса измерений лидара, определяемый такими его характеристиками, как точность и подробность формируемых 3D-изображений.

Такая плоская модель рабочей зоны с банком опорных изображений обеспечивает автоматическое планирование и обработку целенаправленных безопасных траекторий движения наземного РТК, оснащенного лидаром [5], в разведанной БПЛА рабочей зоне.

Результаты экспериментальных исследований и заключение. Результаты экспериментальных исследований разработанных средств видеонавигации роботов воздушно-го и наземного применения в реальных урбанизированных средах внутри зданий и в условиях плотной городской застройки приведены на рис. 11 и 12.

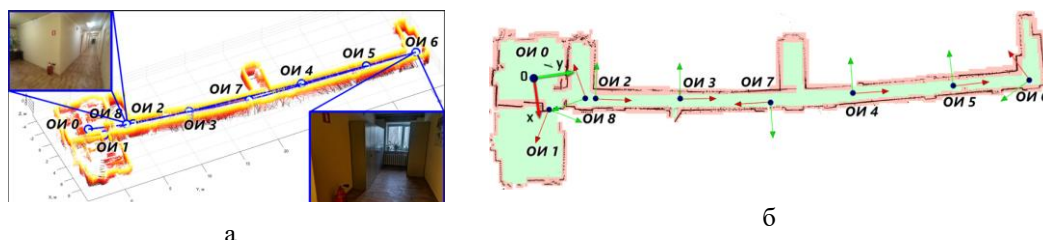


Рис. 11. Результаты экспериментальных исследований внутри здания:
 а – объемная модель рабочей зоны с опорными изображениями;
 б – план опорной поверхности с опорными изображениями

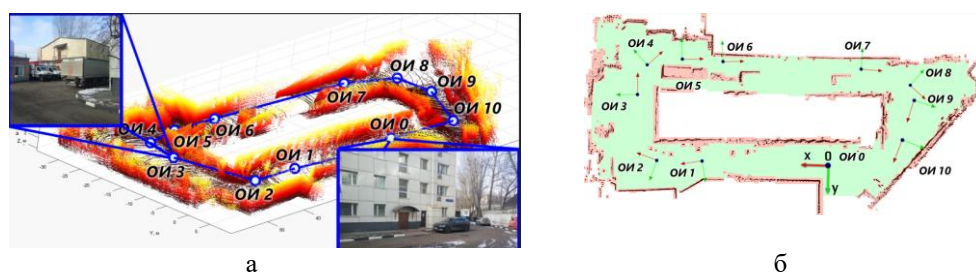


Рис. 12. Результаты экспериментальных исследований в условиях плотной городской застройки: а – объемная модель рабочей зоны с опорными изображениями;
 б – план опорной поверхности с опорными изображениями

На рис. 11,а и 12,а показаны результаты решения SLAM-задачи по данным бортовой СТЗ в процессе полета БПЛА – сформированы объединенные объемные модели внешней среды с опорными горизонтальными 2D-дальнометрическими изображениями (ОИ1, ОИ2,...), которые позволяют обеспечить полностью автономный полет БПЛА в данных рабочих зонах. На 11,б и 12,б показаны результаты построения карты опорной поверхности, с разрешенными для движения участками (показаны зеленым цветом) с теми же опорными изображениями, которые так же позволяют обеспечить полностью автономное движение наземного РТК в данных рабочих зонах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhehan Li, Rui Mao, Nanhe Chen, Chao Xu, Fei Gao, Yanjun Cao. ColAG: A collaborative Air-Ground Framework for Perception-Limited UGVs' Navigation // arxiv. – URL: <https://arxiv.org/abs/2310.13324> (дата обращения: 15.01.2025).
2. Yang J., Wen C.-K., Yang X., Xu J., Du T., and Jin S. Multi-domain cooperative SLAM: The enabler for integrated sensing and communications // IEEE Wireless Commun. – Feb. 2023. – Vol. 30, No. 1. – P. 40-49.
3. Баричев Ю.С., Гойдин О.П., Носков В.П., Собольников С.А. Формирование информационно-навигационного поля роботов воздушного базирования в урбанизированной среде // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 213-225.
4. Казьмин В.Н., Носков В.П. Выделение геометрических и семантических объектов в дальнометрических изображениях для навигации роботов и реконструкции внешней среды // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 10 (171). – С. 71-83.
5. Носков В.П., Киселев И.О. Трехмерный вариант метода Хафа в реконструкции внешней среды и навигации // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – № 8. – С. 552-560.
6. Носков В.П., Киселев И.О. Выделение плоских объектов в линейно структурированных 3D-изображениях // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – № 2 (19). – С. 31-38.
7. Загоруйко С.Н., Казьмин В.Н., Носков В.П. Навигация БПЛА и 3D-реконструкция внешней среды по данным бортовой СТЗ // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 8. – С. 62-68.
8. Лакота Н.А., Носков В.П., Рубцов И.В., Лундгрэн Я.-О., Моор Ф. Опыт использования элементов искусственного интеллекта в системе управления цехового транспортного робота // Мехатроника. – 2000. – № 4. – С. 44-47.

9. Носков В.П., Носков А.В. Распознавание ориентиров в дальнометрических изображениях // Мобильные роботы и мехатронные системы. – 2001. – С. 179-192.
10. Носков В.П., Носков А.В. Навигация мобильных роботов по дальнометрическим изображениям // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 12. – С. 16-21.
11. Носков В.П., Рубцов И.В., Романов А.Ю. Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видеокамеры и дальномера // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 8. – С. 2-5.
12. Носков В.П., Киселев И.О. Использование текстуры линейных объектов для построения модели внешней среды и навигации // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – № 8. – С. 490-497.
13. David L. Object recognition from local scale-invariant features // Proceedings of the International Conference on Computer Vision. – 1999. – Vol. 2. – P. 1150.
14. Bay H., Tuytelaars T., Gool L.V. SURF: Speeded Up Robust Features // Computer Vision and Image Understanding. – 2008. – URL: <http://www.vision.ee.ethz.ch/~surf/eccv06.pdf>.
15. Ke Y., Sukthankar R. PCA-SIFT: A More Distinctive Representation for Local Image Descriptors. – URL: <http://www.cs.cmu.edu/~rahuls/pub/cvpr2004-keypoint-rahuls.pdf>.
16. Носков В.П., Курьянов А.Н. Использование комплексированных дескрипторов в решении SLAM-задачи // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1. – С. 268-278.
17. Носков В.П., Курьянов А.Н., Иванушкин В.И. Анализ средств видео-навигации методами математического моделирования // Тр. 34-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», 23-24 ноября 2023 г. – СПб.: Изд-во: ЦНИИ РТК, 2023. – С. 36-46.
18. <https://classic.gazebosim.org/>.
19. <https://docs.ros.org/en/humble/index.html>.
20. Pascal Goldschmid, Aamir Ahmad. Integrated Multi-Simulation Environments for Aerial Robotics Research. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.10218>.

REFERENCES

1. Zhehan Li, Rui Mao, Nanhe Chen, Chao Xu, Fei Gao, Yanjun Cao. ColAG: A collaborative Air-Ground Framework for Perception-Limited UGVs' Navigation, *arxiv*. Available at: <https://arxiv.org/abs/2310.13324> (accessed 15 January 2025).
2. Yang J., Wen C.-K., Yang X., Xu J., Du T., and Jin S. Multi-domain cooperative SLAM: The enabler for integrated sensing and communications, *IEEE Wireless Commun*, Feb. 2023, Vol. 30, No. 1, pp. 40-49.
3. Barichev Yu.S., Goydin O.P., Noskov V.P., Sobol'nikov S.A. Formirovanie informatsionno-navigatsionnogo polya robotov vozdušnogo bazirovaniya v urbanizirovannoy srede [Formation of the information and navigation field of air-based robots in an urbanized environment], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 1, pp. 213-225.
4. Kaz'min V.N., Noskov V.P. Vydelenie geometricheskikh i semanticheskikh ob'ektov v dal'nometricheskikh izobrazheniyakh dlya navigatsii robotov i rekonstruktsii vneshney sredy [Selection of geometric and semantic objects in ranging images for robot navigation and reconstruction of the external environment], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 10 (171), pp. 71-83.
5. Noskov V.P., Kiselev I.O. Trekhmernyy variant metoda KHafa v rekonstruktsii vneshney sredy i navigatsii [Three-dimensional version of the Hough method in the reconstruction of the external environment and navigation], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2018, No. 8, pp. 552-560.
6. Noskov V.P., Kiselev I.O. Vydelenie ploskikh ob'ektov v lineynno strukturirovannykh 3D-izobrazheniyakh [Selection of flat objects in linearly structured 3D images], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2018, No. 2 (19), pp. 31-38.
7. Zagoruyko S.N., Kaz'min V.N., Noskov V.P. Navigatsiya BPLA i 3D-rekonstruktsiya vneshney sredy po dannym bortovoy STZ [UAV navigation and 3D reconstruction of the external environment based on onboard vision system data], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2014, No. 8, pp. 62-68.
8. Lakota N.A., Noskov V.P., Rubtsov I.V., Lundgren Ya.-O., Moor F. Opyt ispol'zovaniya elementov iskusstvennogo intellekta v sisteme upravleniya tsekhovogo transportnogo robota [Experience of using elements of artificial intelligence in the control system of a workshop transport robot], *Mekhatronika* [Mechatronics], 2000, No. 4, pp. 44-47.
9. Noskov V.P., Noskov A.V. Raspoznavanie orientirov v dal'nometricheskikh izobrazheniyakh [Recognition of landmarks in ranging images], *Mobil'nye roboty i mekhatronnye sistemy* [Mobile robots and mechatronic systems], 2001, pp. 179-192.
10. Noskov V.P., Noskov A.V. Navigatsiya mobil'nykh robotov po dal'nometricheskimi izobrazheniyam [Navigation of mobile robots using rangefinder images], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2005, No. 12, pp. 16-21.

11. Noskov V.P., Rubtsov I.V., Romanov A.Yu. Formirovanie ob"edinennoy modeli vneshney sredy na osnove informatsii videokamery i dal'nomera [Formation of a combined model of the external environment based on information from a video camera and a rangefinder], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2007, No. 8, pp. 2-5.
12. Noskov V.P., Kiselev I.O. Ispol'zovanie tekstury lineynykh ob"ektov dlya postroeniya modeli vneshney sredy i navigatsii [Using the texture of linear objects to build a model of the external environment and navigation], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2019, No. 8, pp. 490-497.
13. David L. Object recognition from local scale-invariant features, *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, 1999, Vol. 2, pp. 1150.
14. Bay H., Tuytelaars T., Gool L.V. SURF: Speeded Up Robust Features, *Computer Vision and Image Understanding*, 2008. Available at: <http://www.vision.ee.ethz.ch/~surf/eccv06.pdf>.
15. Ke Y., Sukthankar R. PCA-SIFT: A More Distinctive Representation for Local Image Descriptors. Available at: <http://www.cs.cmu.edu/~rahuls/pub/cvpr2004-keypoint-rahuls.pdf>.
16. Noskov V.P., Kur'yanov A.N. Ispol'zovanie kompleksirovannykh deskriptorov v reshenii SLAM-zadachi [Using complex descriptors in solving the SLAM problem], *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1, pp. 268-278.
17. Noskov V.P., Kur'yanov A.N., Ivanushkin V.I. Analiz sredstv video-navigatsii metodami matematicheskogo modelirovaniya [Analysis of video navigation tools by mathematical modeling methods], *Tr. 34-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Ekstremal'naya robototekhnika», 23-24 noyabrya 2023 g.* [Proceedings of the 34th International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics", November 23-24, 2023]. Saint Petersburg: Izd-vo: TSNII RTK, 2023, pp. 36-46.
18. Available at: <https://classic.gazebosim.org/>.
19. Available at: <https://docs.ros.org/en/humble/index.html>.
20. Pascal Goldschmid, Aamir Ahmad. Integrated Multi-Simulation Environments for Aerial Robotics Research. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.10218>.

Носков Владимир Петрович – МГТУ им. Н.Э. Баумана; e-mail: noskov_mstu@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79166766057; к.т.н.; зав. сектором НИИСМ.

Баричев Юрий Сергеевич – ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»; e-mail: ybarichev@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79191396529; инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории.

Гойдин Олег Петрович – ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»; e-mail: crer@vniia.ru; г. Москва, Россия; руководитель центра робототехники и аварийного реагирования.

Курьянов Алексей Николаевич – ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»; e-mail: tigr-kur@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79258248138; инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории.

Noskov Vladimir Petrovich – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: noskov_mstu@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79166766057; cand. of eng. sc.; NIISM sector head.

Barichev Yury Sergeevich – FSUE "VNIIA"; e-mail: ybarichev@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79191396529; research-engineer of the research laboratory.

Goydin Oleg Petrovich – FSUE "VNIIA"; e-mail: crer@vniia.ru; Moscow, Russia; head of the Center for Robotics and Emergency Response.

Kuryanov Alexsei Nikolaevich – FSUE "VNIIA"; e-mail: tigr-kur@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79258248138; research-engineer of the research laboratory.

УДК 004.81: 004.75

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-108-117

И.А. Пшенокова, К.Ч. Бжихатлов, М.А. Канокова

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПАРКОВОЧНЫХ МЕСТ В ИНФРАСТРУКТУРЕ ГОРОДА

В условиях растущего числа автомобилей и ограниченного пространства многие города осознают важность внедрения интеллектуальных парковочных систем для улучшения городской мобильности и удобства для водителей. Уровень внедрения интеллектуальных парковок на основе различных технологических решений растет, однако для достижения максимальной эффективно-

сти необходимо продолжать развивать технологии, интегрировать их с другими системами и учитывать потребности пользователей. Цель исследования – разработать мультиагентную интеллектуальную систему контроля и управления бронированием парковочных мест в сети парковок города. Разработана архитектура мультиагентной интеллектуальной системы управления парковочными местами, которая обеспечивает автоматическое управление доступом к парковочным местам с учетом пожеланий владельцев парковок, заказов водителей, дорожной ситуации в городе и требований безопасности. Основным элементом разрабатываемой системы является парковка, которая представлена набором парковочных мест, оборудованных автоматизированными системами управления парковочным местом (парковишки), системой связи и средствами сбора данных (камера наблюдения и метеостанции). Управление парковочными местами и парковишками осуществляется интеллектуальной системой управления на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. Разработан прототип программно-аппаратного комплекса мультиагентной интеллектуальной системы управления парковочными местами в виде клиент-серверной архитектуры. Сервер отвечает за сбор, обработку, хранение данных и управление автоматизированными парковишками. К серверу подключается два вида клиентов – мобильное приложение администратора и водителя. Администратор имеет возможность управления парковкой (установка фиксированных цен или использование рекомендаций сервера, бронирование парковочных мест для сотрудников) и просмотра статистики (текущая загрузка, статистика по парковке, данные о принятых оплатах, прогноз работы парковки, рекомендации). У водителя реализована возможность просмотра состояния парковок в интересующей области (количество свободных мест, время ожидания свободного места, стоимость, рекомендации по наиболее удобной парковке) и бронирования парковочного места с возможностью онлайн оплаты.

Умный город; интеллектуальная парковка; распределение транспортных потоков; мультиагентные системы; нейрокогнитивные алгоритмы.

I.A. Pshenokova, K.Ch. Brzhikhatlov, M.A. Kanokov

MULTI-AGENT INTELLIGENT SYSTEM FOR CONTROL OF PARKING SPACES IN CITY INFRASTRUCTURE

With the growing number of cars and limited space, many cities are realizing the importance of implementing intelligent parking systems to improve urban mobility and convenience for drivers. The level of implementation of intelligent parking based on various technological solutions is growing, but to achieve maximum efficiency, it is necessary to continue to develop technologies, integrate them with other systems and take into account the needs of users. The purpose of the study is to develop a multi-agent intelligent system for monitoring and managing parking space reservations in the city parking network. The architecture of a multi-agent intelligent parking management system has been developed, which provides automatic access control to parking spaces taking into account the wishes of parking lot owners, driver orders, the traffic situation in the city and safety requirements. The main element of the developed system is parking, which is represented by a set of parking spaces equipped with automated parking space management systems (parking attendants), a communication system and data collection tools (surveillance camera and weather stations). Parking spaces and parking attendants are managed by an intelligent control system based on multi-agent neurocognitive architectures. A prototype of a hardware and software complex of a multi-agent intelligent parking space management system has been developed in the form of a client-server architecture. The server is responsible for collecting, processing, storing data and managing automated parking attendants. Two types of clients are connected to the server - a mobile application of the administrator and the driver. The administrator has the ability to manage parking (set fixed prices or use server recommendations, book parking spaces for employees) and view statistics (current load, parking statistics, data on accepted payments, parking work forecast, recommendations). The driver has the ability to view the status of parking in the area of interest (number of free spaces, waiting time for a free space, cost, recommendations for the most convenient parking) and book a parking space with the ability to pay online.

Smart city; intelligent parking; distribution of traffic flows; multi-agent systems; neurocognitive algorithms.

Введение. В условиях растущего числа автомобилей и ограниченного пространства в городской инфраструктуре, существующие неуправляемые автостоянки затрудняют размещение транспортных средств надлежащим и удобным способом, поэтому все более актуальными становятся интеллектуальные парковочные системы. Внедрение «интеллектуальных парковок» способствует увеличению мобильности в черте города, снижению вы-

бросов углекислого газа и других загрязняющих веществ в атмосферу, оптимизации использования пространства и комплексному подходу к управлению городской инфраструктурой. Уровень внедрения интеллектуальных парковок в современных городах варьируется в зависимости от региона, инфраструктуры и готовности местных властей к инновациям.

В настоящее время разработано и внедрено множество технологических решений для интеллектуальных парковочных систем. Интеллектуальные парковочные системы должны обеспечивать динамическое распределение и бронирование парковочных мест, а также мониторинг парковочных мест и местонахождения любого автомобиля в любое время.

Так, например, для мониторинга уровня заполняемости больших открытых парковок разработана не очень дорогая и простая в развертывании система, которая только контролирует въезд или выезд транспортных средств с парковочной зоны [1].

Системы, которые используются на крытых парковочных местах являются более сложными и дорогими, чем системы контроля въезда и выезда, так как требуют оснащения каждого парковочного места датчиками и более сложной коммуникационной инфраструктуры. Эти системы предоставляют пользователям более полезную и подробную информацию и могут быть объединены со службами позиционирования и наведения, чтобы помочь точно прогнозировать и определять занятость места в режиме реального времени [2].

В статье [3] рассматривается проектирование и разработка интеллектуальной системы управления парковочными местами в режиме реального времени, в которой парковочные места для сотрудников и посетителей организации определяются интеллектуальным мобильным приложением. Для мониторинга и управления парковкой использовались камеры, датчики и программное обеспечение для машинного обучения Интернета вещей (IoT), включая OpenCV версии 4.5.5 и TensorFlow версии 2.14.0.

В работе [4] для выбора подходящего парковочного места использовалась искусственная нейронная сеть. Разработанная авторами парковочная система, анализируя поведение сотрудников подсказывает подходящее время и место парковки. Однако в ней отсутствует система управления в реальном времени.

В работах [5–7] представлены мобильные приложения для водителей для обнаружения подходящих парковочных мест в заданном квадрате.

В [8] представлена система, которая позволяет уменьшить заторы на открытых парковочных местах за счет помощи водителям в аккуратной парковке своих автомобилей. Для сбора и обработки данных авторы используют архитектуру сверточной нейронной сети и длительной кратковременной памяти (CNN-LSTM), а также комплексные панорамные изображения на 360 градусов, ультразвуковые измерения и измерения расстояния между датчиками.

А в работе [9] представлена модель автоматического определения занятости парковки. Данные поступают с 360-градусной камеры с высоты птичьего полета, а также ультразвуковых датчиков для точного определения присутствия соседних транспортных средств.

В [10] проведен анализ интеллектуальных систем управления парковками, которые используют передовые технологии для оптимизации использования парковочных мест. Автором рассматриваются различные подходы к управлению парковочными пространствами в многоуровневых парковках, включая применение искусственного интеллекта, машинного обучения и больших данных для анализа трафика и предсказания потребностей в парковке. В статье [11] рассматриваются различные интеллектуальные службы парковки, используемые для управления парковками.

В работах [12, 13] представлена система, которая использует методы машинного обучения для прогнозирования поведения водителей при парковке по результатам обработки ранее собранных данных и статистики дорожного движения в режиме реального времени.

В [14–16] представлена интеллектуальная умная система парковки с использованием сверточной нейронной сети. Для определения доступных парковочных мест по изображениям с камер парковки используется компьютерное зрение и обработка изображений.

Уровень внедрения интеллектуальных парковок продолжает расти, и многие города осознают важность таких систем для улучшения городской мобильности и удобства для водителей. Однако для достижения максимальной эффективности необходимо продолжать развивать технологии, интегрировать их с другими системами и учитывать потребности пользователей.

Цель исследования – разработать мультиагентную интеллектуальную систему контроля и управления бронированием парковочных мест в сети парковок города.

Концепция мультиагентной интеллектуальной системы управления парковочными местами. Разрабатываемая система предполагает оптимизацию нагрузки на транспортную сеть города и максимизацию оборачиваемости парковочных мест за счет использования интеллектуальной системы управления бронированием парковочных мест. Для этого разработана мультиагентная система, состоящая из набора устройств для управления парковочным местом, объединенных в сеть парковок города. Подобная система должна обеспечивать автоматическое управление доступом к парковочным местам с учетом пожеланий владельцев парковок, заказов водителей, дорожной ситуации в городе и требований безопасности. Архитектура системы приведена на рис. 1.

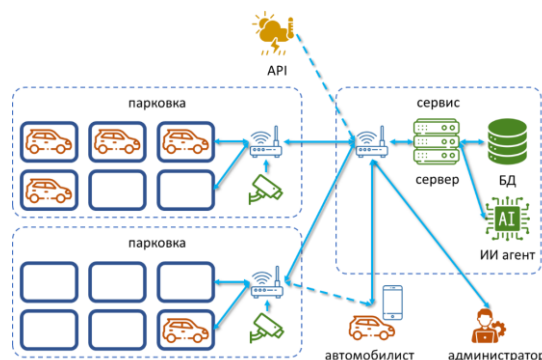


Рис. 1. Архитектура мультиагентной интеллектуальной системы управления парковочными местами

Основным элементов разрабатываемой системы является парковка, которая представлена набором парковочных мест, оборудованных автоматизированными системами управления парковочным местом. Кроме того, парковка имеет собственную систему связи (в качестве которой может выступать WiFi или LoRaWan роутер) и дополнительные средства сбора данных (например, камеру наблюдения). Все данные с парковок города собираются на сервере мультиагентной интеллектуальной системы управления парковочными местами, который состоит из системы связи, непосредственно сервера с базой данных и интеллектуальной системы принятия решений. Сервер отвечает за сбор, обработку, хранение данных и управление автоматизированными парковщиками. Кроме данных с парковой, сервер собирает информацию из внешних источников, например данные о погоде из подключенных к системе метеостанций [17]. Наличие всех этих данных, а также информации о бронировании парковочных мест позволит интеллектуальной системе принятия решений прогнозировать загрузку парковок и подбирать цены и ограничения в сроках бронирования так, чтобы максимально равномерно распределить автомобили по парковкам и снизить нагрузку на транспортную сеть города, при этом максимизировав оборачиваемость парковки для владельца.

Взаимодействие водителя с системой осуществляется через разработанное мобильное приложение, которое позволяет отправлять заказы и данные о расположении автомобилиста. Соответственно, при приближении транспортного средства к забронированной парковке она освобождает место и начинает отсчет времени (для платных или ограниченных парковок). Кроме водителей, с системой взаимодействуют владельцы парковок и сотрудники транспортных служб города.

Аппаратно-программная реализация системы управления парковками. Для обеспечения управления парковочным местом разработано автоматизированное устройство (парковщик), которое должно не только блокировать и освобождать парковочное место, но и следить за наличием автомобиля над ним, а также отслеживать свое положение и целостность. Схема устройства приведена на рис. 2.



Рис. 2. Схема устройства для управления парковочными местами

Устройство представляет собой плоский прямоугольный блок, устанавливаемый непосредственно на парковочное место. Для блокировки парковочного места устройство раскрывается и ставит шит, препятствующий наезду автомобиля на парковочное место. Управление парковщика обеспечивается микроконтроллером, который собирает данные с сенсорной сети и управляет светозвуковой индикацией и приводом шлагбаума. Сенсорная сеть состоит из датчика наличия автомобиля над парковщиком (ультразвуковой или инфракрасный датчик расстояния), датчиков холла, отслеживающих положение шита для блокировки места, датчика расположения (GPS или ГЛОНАСС) и инерциального датчика (10 осевой IMU сенсор), отвечающего за попытку перемещения или взлома робота. За обеспечение энергией отвечает аккумулятор с системой контроля уровня заряда. Передача данных обеспечивается системой связи на основе WiFi, LoRaWan или 3G/LTE сетей. Внешний вид устройства в сложенном и раскрытом состоянии приведен на рис. 3. Размеры и материалы парковщика позволяют автомобилю наезжать на него без опасности повредить механическую и электронную подсистемы. Стоит отметить, что прототип испытывался в КБНЦ РАН в течении года при всех погодных условиях.

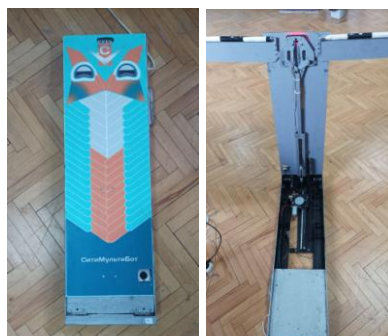


Рис. 3. Внешний вид устройства для управления парковочными местами

Управление системой обеспечивается на сервере с системой принятия решений. Каждый парковщик отвечает за контроль парковочного места и выполнения команд с сервера. Кроме того, на сервер попадают данные из дополнительных источников (камеры на парковках или метеостанции в городе). Сервер, в свою очередь отвечает за сбор заказов пользователей (бронирование водителем или администратором парковки) и управление парковщиками (блокировка, разблокировка, индикация состояния). За счет использования интеллектуальных систем обработки данных и собранной статистики использования парковочных мест на сервере можно строить прогнозы загруженности парковки в зависимости от времени суток, дня недели, погоды и т.д. Эти данные в свою очередь позволяют строить модели распределения автомобилей по парковкам и подбирать оптималь-

ные условия распределения парковочных мест с учетом задач минимизации нагрузки на транспортную сеть и максимизации оборачиваемости парковки (для платных парковок). То есть, система принятия решений должна подбирать рекомендации по оптимальному маршруту для водителя и ценовую политику для владельца парковки.

К серверу подключается два вида клиентов – приложение администратора и водителя. Администратор имеет возможность управления парковкой (установка фиксированных цен или использование рекомендаций сервера, бронирование парковочных мест для сотрудников) и просмотра статистики (текущая загрузка, статистика по парковке, данные о принятых оплатах, прогноз работы парковки, рекомендации). У водителя реализована возможность просмотра состояния парковок в интересующей области (количество свободных мест, время ожидания свободного места, стоимость, рекомендации по наиболее удобной парковке) и бронирования парковочного места с возможностью онлайн оплаты. Уже при приближении к парковке приложение определяет координаты автомобиля и отправляет команду на разблокировку парковщика, а также ведет учет времени и стоимости парковки. Архитектура взаимодействия программного обеспечения в интеллектуальной системе управления парковками показана на рис. 4.

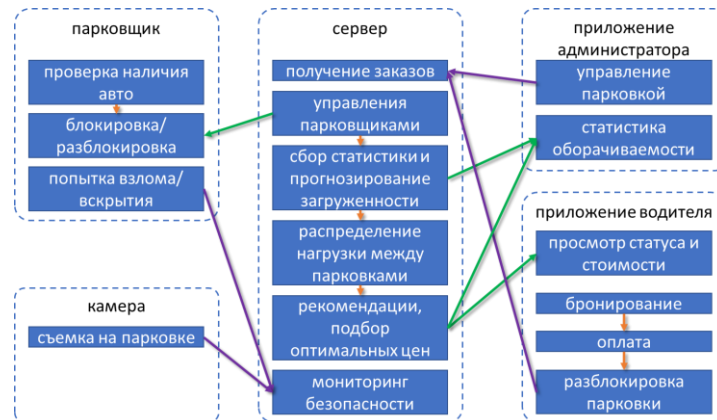


Рис. 4. Архитектура взаимодействия программного обеспечения в системе управления парковками

Подобная реализация системы позволяет достаточно легко масштабировать систему сбора данных и управления парковками. Например, объем передаваемых на сервер данных можно определить как:

$$I_{sens} = \sum_{i=0}^m (P_i \cdot k_r + k_p) + n \cdot k_a + k_s,$$

где I_{sens} – объем передаваемых данных, m – количество парковой, n – количество транспортных средств, P_i – количество парковочных мест на i -ой парковке, k_r – объем данных с одного парковочного места, k_p – объем данных с парковки (за исключением парковочных мет, то есть данные с камеры и т.д.), k_a – объем данных из приложения водителя, k_s – объем данных с общих для города сенсоров (метеостанции и т.д.). То есть нагрузка на сервер и систему связи растет линейно с ростом размера города (количестве транспортных средств и доступных парковочных мет).

На текущем этапе ведется тестирование прототипа программно-аппаратного комплекса мультиагентной интеллектуальной системы управления парковочными местами. Серверная часть программы написана на языке программирования python с использованием фреймворка flask. Связь с парковщиками и приложениями автомобилиста и администратора осуществляется по протоколу TCP/IP за счет обмена json сообщениями. Программа для автомобилистов реализована в виде приложения для смартфонов на языке программирования dart. Кроме того, на сервере отдельно развернута программа моделирования мульт

тиагентных нейрокогнитивных архитектур [18], отвечающая за реализацию интеллектуальной системы принятия решений. Программа написана на языке программирования C++ и использует протокол *webSockets* для подключения к основной части сервиса.

Нейрокогнитивная архитектура управления распределенной сетью парковок.

Интеллектуальная система принятия решений для управления распределенной сетью парковок реализована на основе мультиагентных нейрокогнитивных алгоритмов [19]. Использование подобного подхода основано на имитационное моделирование процессов обмена информацией между нейронами головного мозга. При этом каждый нейрон рассматривается как рациональный агент, имеющий собственную целевую функцию максимизации энергии и собственную базу знаний, позволяющую выстраивать свое взаимодействие с другими нейронами. Группы нейронов могут быть объединены в функциональные системы или интеллектуальных агентов, которые также могут обмениваться информацией и энергией между собой.

В задаче управления парковкой подобная система обеспечивает сбор данных, поступающих на агенты-сенсоры. Каждый подобный сенсор отвечает за какой-либо источник информации во внешнем мире. Полученные с сенсоров данные позволяют создавать новые нейроны, отвечающие за репрезентацию обнаруженных в реальном мире объектов, их свойств и действий. Например, информация о факте бронирования парковочного места позволит создать агента-событие. При этом подобный агент связан с множеством других агентов различных типов (объекты, действия, свойства, числительные и т.д.), что позволяет строить онтологическое описание факта парковки. Пример подобного мультиагентного факта приведен на рис. 5.

Событие «автомобиль занял место» связано с соответствующими агентами-нейронами за счет заключения мультиагентных договоров, которые несут информацию не только о контрагенте, но и ключевом слове срабатывания договора (на какой вопрос может ответить агент) и корреляции (количестве совместных срабатываний агентов). Это позволит использовать подобные мультиагентные факты для дальнейшего построения причинно-следственных связей, моделирования развития ситуации и подбора оптимального для агентов пути поведения [20, 21]. Таким образом, данные, собранные с парковки и приложений, вносятся в систему для создания отдельных интеллектуальных агентов, моделирующих целенаправленное поведение водителей и их взаимодействие с парковками города в целом. Структура модели представлена на рис. 6.

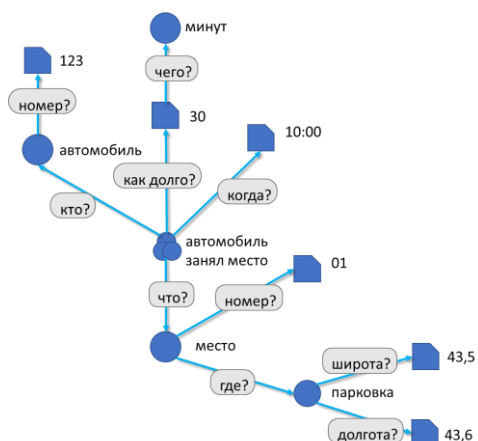


Рис. 5. Пример мультиагентного факта бронирования места



Рис. 6. Модель взаимодействия элементов системы «водитель – парковка – город»

На данном этапе ведется работа по сбору данных в мультиагентной нейрокогнитивной архитектуре, что позволит построить адекватные модели поведения водителей и подобрать оптимальные стратегии ценообразования для парковок. Скриншот трехмерной визуализации модели поведения водителей с окна редактора мультиагентных нейрокогнитивных архитектур приведен на рис. 7.

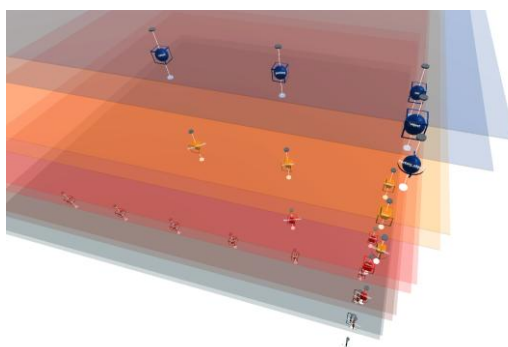


Рис. 7. Скриншот трехмерной визуализации разработанной мультиагентной архитектуры

Полученные мультиагентные модели в дальнейшем позволят обеспечить максимально точное прогнозирование поведения водителей для разных случаев распределения цен и свободных мест на парковках. Такое прогнозирование позволит автоматически подбирать оптимальную, как для автовладельцев, так и для владельцев парковок стратегию ценообразования и условий бронирования с учетом нагрузки на транспортную сеть города.

Заключение. В работе представлена архитектура мультиагентной интеллектуальной системы управления парковочными местами, которая обеспечивает автоматическое управление доступа к парковочным местам с учетом пожеланий владельцев парковок, заказов водителей, дорожной ситуации в городе и требований безопасности в режиме реального времени. Интеллектуальная парковочная система оборудована автоматизированными системами управления парковочным местом (парковщики), системой связи и средствами сбора данных (камера наблюдения и метеостанции). Управление парковочными местами и парковщиками осуществляется интеллектуальной системой управления на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур.

Разработан прототип программно-аппаратного комплекса мультиагентной интеллектуальной системы управления парковочными местами в виде клиент-серверной архитектуры. Сервер отвечает за сбор, обработку, хранение данных и управление автоматизированными парковщиками. К серверу подключается два вида клиентов – мобильное приложение администратора и водителя, которое позволяет администратору управлять парковкой и вести мониторинг, а водителю бронировать свободные парковочные места в заданном квадрате в режиме реального времени и с возможностью онлайн оплаты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Vera-Gómez J.A. et al. An intelligent parking management system for urban areas // Sensors. – 2016. – Vol. 16, No. 6. – P. 931. – <https://doi.org/10.3390/s16060931>.
2. Ahad A., Khan Z.R., Ahmad S.A. Intelligent parking system // World Journal of Engineering and Technology. – 2016. – Vol. 4, No. 2. – P. 160-167.
3. Elfaki A.O. et al. A smart real-time parking control and monitoring system // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 24. – P. 9741. – <https://doi.org/10.3390/s23249741>.
4. Shin J.H., Jun H.B., Kim J.G. Dynamic control of intelligent parking guidance using neural network predictive control // Computers & Industrial Engineering. – 2018. – Vol. 120. – P. 15-30.
5. Liu J., Wu J., Sun L. Control method of urban intelligent parking guidance system based on Internet of Things // Computer Communications. – 2020. – Vol. 153. – P. 279-285.
6. Canli H., Toklu S. Deep learning-based mobile application design for smart parking // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 61171-61183.

7. Aditya A. et al. An IoT assisted intelligent parking system (IPS) for smart cities // *Procedia Computer Science*. – 2023. – Vol. 218. – P. 1045-1054.
8. Ma Z. et al. Intelligent Parking Control Method Based on Multi-Source Sensory Information Fusion and End-to-End Deep Learning // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, No. 8. – P. 5003.
9. Dev N.M. et al. Parking Space Detector // *Grenze International Journal of Engineering & Technology (GIJET)*. – 2023. – Vol. 9, No. 1.
10. Карпов А.С. Системы интеллектуального управления парковочными пространствами // *Вестник науки*. – 2024. – Т. 4, № 6 (75). – С. 1412-1419.
11. Панина В.С., Амеличев Г.Э., Белов Ю.С. Интеллектуальная парковочная система как часть интеллектуальной транспортной системы // *E-Scio*. – 2022. – № 1 (64). – С. 445-452.
12. Singh T. et al. Artificial intelligence-enabled smart parking system // *International Conference on Electrical and Electronics Engineering*. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. – P. 419-436.
13. Alymani M. et al. Enabling smart parking for smart cities using Internet of Things (IoT) and machine learning // *PeerJ Computer Science*. – 2025. – Vol. 11. – P. e2544.
14. Alsheikh A.A. et al. An intelligent smart parking system using convolutional neural network // *Journal of Sensors*. – 2022. – Vol. 2022, No. 1. – P. 7571716.
15. Панина В.С., Амеличев Г.А., Белов Ю.С. Интеллектуальная парковочная система на основе сверточных нейронных сетей // *Научное обозрение. Технические науки*. – 2022. – № 1. – С. 29-33. – URL: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1382> (дата обращения: 26.02.2025).
16. Rashidi M.R. et al. IoT-Enabled Smart Parking System Using Artificial Intelligence and Optical Character Recognition // 2024 6th International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA). – IEEE, 2024. – P. 1-6.
17. Пшенокова И.А., Бжикхатлов К.Ч., Унагасов А.А., Абазоков М.А. Мультиагентный алгоритм сбора данных с метеостанции для прогнозирования урожайности и состояния посевов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2022. – № 1 (225). – С. 91-101.
18. Nagoev, Z., Bzhikhatlov, K., Pshenokova, I., Unagasov, A. Algorithms and Software for Simulation of Intelligent Systems of Autonomous Robots Based on Multi-agent Neurocognitive Architectures / In: Ronzhin A., Savage J., Meshcheryakov R. (eds) // *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2024. Lecture Notes in Computer Science*. – 2024. – Vol. 14898. – Springer, Cham. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-71360-6_29.
19. Нагоев З.В. Интеллект, или мышление в живых и искусственных системах. – Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2013. – 211 с.
20. Пшенокова И.А., Нагоева О.В., Анишев А.З., Энес А.З. Формирование динамических причинно-следственных зависимостей при управлении поведением интеллектуального агента на основе формализма мультиагентных нейрокогнитивных архитектур // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. – 2022. – № 5 (109). – С. 73-80. – DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-73-80.
21. Bzhikhatlov K., Nagoeva O., Anchokov M., Makoeva D. Methods and Algorithms (Modeling of Reasoning) to Synthesize Intellectual Behavior of Autonomous Mobile Robots and Program Complexes Based on Received Reasoning Models / In: Samsonovich, A.V., Liu, T. (eds). *Biologically Inspired Cognitive Architectures 2024. BICA 2024. Studies in Computational Intelligence*. – 2024. – Vol. 477. – Springer, Cham. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-76516-2_7.

REFERENCES

1. Vera-Gómez J.A. et al. An intelligent parking management system for urban areas, *Sensors*, 2016, Vol. 16, No. 6, pp. 931. Available at: <https://doi.org/10.3390/s16060931>.
2. Ahad A., Khan Z.R., Ahmad S.A. Intelligent parking system, *World Journal of Engineering and Technology*, 2016, Vol. 4, No. 2, pp. 160-167.
3. Elfaki A.O. et al. A smart real-time parking control and monitoring system, *Sensors*, 2023, Vol. 23, No. 24, pp. 9741. Available at: <https://doi.org/10.3390/s23249741>.
4. Shin J.H., Jun H.B., Kim J.G. Dynamic control of intelligent parking guidance using neural network predictive control, *Computers & Industrial Engineering*, 2018, Vol. 120, pp. 15-30.
5. Liu J., Wu J., Sun L. Control method of urban intelligent parking guidance system based on Internet of Things, *Computer Communications*, 2020, Vol. 153, pp. 279-285.
6. Canli H., Toklu S. Deep learning-based mobile application design for smart parking, *IEEE Access*, 2021, Vol. 9, pp. 61171-61183.
7. Aditya A. et al. An IoT assisted intelligent parking system (IPS) for smart cities, *Procedia Computer Science*, 2023, Vol. 218, pp. 1045-1054.
8. Ma Z. et al. Intelligent Parking Control Method Based on Multi-Source Sensory Information Fusion and End-to-End Deep Learning, *Applied Sciences*, 2023, Vol. 13, No. 8, pp. 5003.
9. Dev N.M. et al. Parking Space Detector, *Grenze International Journal of Engineering & Technology (GIJET)*, 2023, Vol. 9, No. 1.

10. Karpov A.C. Sistemy intellektual'nogo upravleniya parkovochnymi prostranstvami [Intelligent parking space management systems], *Vestnik nauki* [Science Bulletin], 2024, Vol. 4, No. 6 (75), pp. 1412-1419.
11. Panina V.S., Amelichev G.E., Belov Yu.S. Intellektual'naya parkovochnaya sistema kak chast' intellektual'noy transportnoy sistemy [Intelligent parking system as part of an intelligent transport system], *E-Scio*, 2022, No. 1 (64), pp. 445-452.
12. Singh T. et al. Artificial intelligence-enabled smart parking system, *International Conference on Electrical and Electronics Engineering*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 419-436.
13. Alymani M. et al. Enabling smart parking for smart cities using Internet of Things (IoT) and machine learning, *PeerJ Computer Science*, 2025, Vol. 11, pp. e2544.
14. Alsheikhy A.A. et al. An intelligent smart parking system using convolutional neural network, *Journal of Sensors*, 2022, Vol. 2022, No. 1, pp. 7571716.
15. Panina V.S., Amelichev G.A., Belov Yu.S. Intellektual'naya parkovochnaya sistema na osnove svertochnykh neyronnykh setey [Intelligent parking system based on convolutional neural networks], *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki* [Scientific Review. Technical Sciences], 2022, No. 1, pp. 29-33. Available at: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1382> (accessed 26 February 2025).
16. Rashidi M.R. et al. IoT-Enabled Smart Parking System Using Artificial Intelligence and Optical Character Recognition, *2024 6th International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSIPA)*. IEEE, 2024, pp. 1-6.
17. Pshenokova I.A., Bzhikhatlov K.Ch., Unagasov A.A., Abazokov M.A. Mul'tiagentnyy algoritm sbora dannykh s meteostantsii dlya prognozirovaniya urozhaynosti i sostoyaniya posevov [Multi-agent algorithm for collecting data from a weather station to forecast crop yields and conditions], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1 (225), pp. 91-101.
18. Nagoev, Z., Bzhikhatlov, K., Pshenokova, I., Unagasov, A. Algorithms and Software for Simulation of Intelligent Systems of Autonomous Robots Based on Multi-agent Neurocognitive Architectures, In: Ronzhin A., Savage J., Meshcheryakov R. (eds), *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2024. Lecture Notes in Computer Science*, 2024, Vol. 14898. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-71360-6_29.
19. Nagoev Z.V. Intellektika, ili myshlenie v zhivyykh i iskusstvennykh sistemakh [Intelligence, or thinking in living and artificial systems]. Nal'chik: Izd-vo KBNTS RAN, 2013, 211 p.
20. Pshenokova I.A., Nagoeva O.V., Apshev A.Z., Enes A.Z. Formirovanie dinamicheskikh prichinno-sledstvennykh zavisimostey pri upravlenii povedeniem intellektual'nogo agenta na osnove formalizma mul'tiagentnykh neyrokognitivnykh arkhitektur [Formation of dynamic cause-and-effect dependencies in controlling the behavior of an intelligent agent based on the formalism of multi-agent neurocognitive architectures], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the RAS], 2022, No. 5 (109), pp. 73-80. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-73-80.
21. Bzhikhatlov K., Nagoeva O., Anchokov M., Makoeva D. Methods and Algorithms (Modeling of Reasoning) to Synthesize Intellectual Behavior of Autonomous Mobile Robots and Program Complexes Based on Received Reasoning Models, In: Samsonovich, A.V., Liu, T. (eds). *Biologically Inspired Cognitive Architectures 2024. BICA 2024. Studies in Computational Intelligence*, 2024, Vol. 477. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-76516-2_7.

Пшенокова Инна Ауюсовна – Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук; e-mail: pshenokova_inna@mail.ru; г. Нальчик, Россия; к.ф.-м.н.; зав. лабораторией «Интеллектуальные среды обитания».

Бжикхатов Кантемир Чамалович – Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук; e-mail: haosit13@mail.ru; тел.: +79631663448; г. Нальчик, Россия; к.ф.-м.н.; зав. лабораторией «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы».

Каноква Мадина Аликовна – Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук; e-mail: kanokova.madina@yandex.ru; г. Нальчик, Россия; научный сотрудник лаборатории «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы».

Pshenokova Inna Auesovna – Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: pshenokova_inna@mail.ru; Nalchik, Russia; cand. of phys. and math. sc.; head of the laboratory «Intellektual'nyye sredy obitaniya».

Bzhikhatlov Kantemir Chamalovich – Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: haosit13@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: +79631663448; cand. of phys. and math. sc.; head of the laboratory «Neurocognitive autonomous intelligent systems».

Kanokova Madina Alikovna – Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: kanokova.madina@yandex.ru; Nalchik, Russia; research fellow “Neurocognitive Autonomous Intelligent Systems”.

Е.Ю. Смирнова, Д.К. Серов, Д.К. Пельменев, Н.П. Коренко, А.Ю. Никулина

**МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БИОМОРФНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ**

В настоящее время активно развивается область подводной робототехники для решения прикладных и исследовательских задач. Одним из перспективных направлений применения подводных роботов является использование конструкций с биоподобным типом плавания. Использование автономных биоморфных подводных роботов (БПР) потенциально позволит расширить область применения малошумных и безопасных для местной фауны подводных роботов для задач мониторинга и исследования местности. Целью работы является разработка и апробация методики модельно-ориентированного проектирования системы управления движением БПР. В рамках данной работы рассмотрена типовая конструкция туниморфного БПР с осцилляторным типом плавания. На примере рассматриваемой конструкции БПР описаны проблемные вопросы моделирования динамики БПР, а также синтеза их систем управления. Для БПР с осцилляторным типом плавания выделены типовые технологические операции (ТОП), выполняемые с учетом конструктивных особенностей БПР и состава их движительно-рулевого комплекса (ДРК). Предложена методика проектирования системы управления БПР на базе совместного использования технологий численного моделирования и классической теории автоматического управления (ТАУ). На основании предложенной методики разработана численная гидродинамическая модель движения туниморфного БПР с осцилляторным типом плавания. Проведены идентификационные вычислительные эксперименты, в рамках которых сняты переходные процессы, характеризующие динамику движения БПР при выполнении каждой отдельной ТОП. На основании проведенных экспериментов разработаны кибернетические модели движения БПР, позволяющие за счет упрощенного моделирования динамики с использованием типовых звеньев теории автоматического управления с переменными коэффициентами воспроизвести движение БПР в рамках выполнения типовых технологических операций. В рамках кибернетических моделей в соответствии с предложенной методикой проведен синтез алгоритмов управления движением БПР для каждой из типовых технологических операций с использованием методов численной оптимизации. Выполнена апробация разработанных алгоритмов на базе вычислительных экспериментов, проведенных в рамках численных гидродинамических моделей. Определены достоинства предложенной методики, а также сформулированы возможные перспективы применения БПР.

Биоморфные подводные роботы, БПР; численная гидродинамическая модель; CFD-модель; кибернетическая модель.

E.Y. Smirnova, D.K. Serov, D.K. Pelmenev, N.P. Korenko, A.Y. Nikulina

**MODEL-BASED BIOMORPHIC UNDERWATER ROBOTS SYSTEM CONTROL
DESIGN**

Currently, the field of underwater robotics is actively developing to solve applied and research problems. One of the promising areas of underwater robots' application is the implementation of bioinspired type of swimming. The use of autonomous bioinspired underwater vehicles (BUV) will potentially expand the scope of application of low-noise and safe for local fauna underwater robots for monitoring and exploring the terrain. The aim of the work is to develop and test a methodology for model-based design of a motion control system for biomorphic underwater robots. In this work a typical BUV design with oscillatory type of swimming is considered. Problematic issues of modeling the BUV dynamics, as well as the synthesis of their control systems are described. For BUVs with oscillatory types of swimming, typical technological operations are identified. Typical technological operations are chosen based on the design features of the BUVs and the composition of their propulsion and steering complex. A control system design methodology based on the combined use of numerical modeling technologies and classical automatic control theory is proposed. Based on the proposed methodology, numerical hydrodynamic BUV's models with oscillatory types of swimming are developed. Identification computational experiments are conducted. The transient processes which characterize BUV's dynamics during the performance of each typical operation are defined. Based on the simulation results, cybernetic simplified models of BUV's based on the typical blocks of the automatic control theory are developed. Based on the cybernetic models, based on the numerical optimization a synthesis of BUV's control system in accordance with the proposed methodology is performed. The developed algorithms are tested based on numerical hydrodynamic simulation results. Possible prospects for the use of the BUV's are formulated.

Bioinspired underwater vehicles; BUV; computational fluid dynamics model; CFD model; cybernetic model.

Введение. В настоящее время область подводной робототехники активно развивается, растет степень автономности подводных роботов и расширяется спектр их применения. Одной из наиболее перспективных задач в подводной робототехнике является применение подводных роботов с биоморфным типом движения. Биоморфные подводные роботы (БПР) активно применяются для мониторинга китайских акваторий за счет бесшумного характера их движения и безопасности для окружающих [1].

Одной из наиболее нетривиальных задач, возникающих при проектировании подводных роботов, является сложность разработки их системы управления в условиях нестационарного характера водной среды, ограничений бортового вычислительного и измерительного комплексов. Принципиальную роль при проектировании системы управления с учетом функционирования объекта управления в данных экстремальных условиях играет математическое моделирование, позволяющее провести синтез и апробацию алгоритмов управления до непосредственной реализации на борту подводного робота.

Для типовых подводных роботов, оснащенных винтовыми движителями, классическим подходом к математическому моделированию является описание динамики робота в соответствии с уравнениями динамики твердого тела, а гидродинамики обтекающей его жидкости – в виде упрощенных аналитических зависимостей, выраженных в виде дополнительных слагаемых в данных уравнениях, таких как силы присоединенных масс, остаточной плавучести, гидродинамического сопротивления и метацентрические моменты [2–4].

Тем не менее, для БПР данный подход не является эффективным в связи с тем, что аналитическое описание воздействия биоморфных движителей на динамику подводного робота в общем виде не поддается аналитическому описанию. Несмотря на то, что существуют различные подходы к моделированию биоподобного движения, например, модель Лайтхилла, (модель удлиненного тела) [5] и модель Гамильтона [6], они не обладают достаточной точностью для учета возможных неустойчивых режимов движения БПР. По этой причине синтез алгоритмов управления движением БПР на базе данных математических моделей можно считать нецелесообразным.

В связи с этим в данной работе предложен методика синтеза системы управления движением БПР, базирующаяся на использовании численных гидродинамических и кибернетических моделей. Результативность применения предложенной методики продемонстрирована на примере управления движением биоморфных подводных роботов осцилляторного типа плавания.

Описание методики модельно-ориентированного проектирования. С учетом недостатков подходов к аналитическому моделированию динамики БПР в рамках данной работы предлагается проводить синтез алгоритмов управления движением БПР на численных гидродинамических и кибернетических моделях.

Под гидродинамической моделью БПР подразумевается математическая модель робота, в рамках которой динамика робота описывается уравнениями динамики твердого тела, а гидродинамика окружающей жидкости – методами численного моделирования [7]. Данный подход предполагает разбиение жидкой среды вокруг робота на элементарные частицы. При этом параметры, характеризующие динамику каждой из данных элементарных частиц, изменяются на каждой итерации расчета в зависимости от параметров соседних частиц на основании уравнений Навье-Стокса [8]. Гидродинамические модели позволяют наиболее точно воспроизводить динамику БПР в водной среде, однако в общем виде не поддаются аналитическому анализу, а также обладают крайне низким быстродействием, в результате чего математические эксперименты в рамках данных моделей занимают на несколько порядков больше времени, чем аналогичные натурные.

На первом этапе предложенной методики на основании геометрических и массо-инерционных характеристик БПР разрабатывается гидродинамическая математическая модель. В рамках данной модели геометрия БПР импортируется в специализированное программное обеспечение, например «Логос», в виде абсолютно твердого препятствия, перемещающегося в расчетной области за счет реализации алгоритмов деформации расчетной сетки. Таким образом, даже без проведения идентификационных натурных испытаний возможно получение математической модели, динамика которой будет максимально приближена к динамике реального робота.

Далее на основании результатов экспериментов на гидродинамической модели выделяется перечень типовых технологических операций, выполняемых роботом с учетом биоморфного характера его ДРК. С учетом того, что в общем случае динамика робота в биоморфными типами движителей не описывается аналитическими зависимостями, при синтезе алгоритмов управления БПР принято ограничить характер управления БПР определенными паттернами, гарантирующие устойчивость движения. Соответственно, для каждой из операций определяется характерный паттерн и характеризующие его параметры с учетом ограничений, накладываемых на конструкцию робота. Стоит отметить, что существуют различные публикации, направленные на получение заданного паттерна, в частности, с использованием алгоритмов CPG [9–11] или методов машинного обучения, например обучения с подкреплением [12–14]. Тем не менее, существенным недостатком данных подходов является необходимость в проведении значительного предварительных экспериментов для создания обучающей выборки, что может быть нецелесообразно в случае, когда система управления проектируется на этапе доработки конструкции.

Затем в рамках гидродинамической модели БПР проводятся идентификационные эксперименты с целью определения переходных процессов, характеризующих каждую из ТОП. Это позволяет на основании полученных экспериментальных данных построить упрощенные одноконтурные нелинейные математические модели, определенные на основании типовых звеньев теории автоматического управления. Параметры данных моделей в явном виде не интерпретируются физически, однако они обладают большей точностью нежели аналитические модели в связи с тем, что позволяют учесть нелинейные гидродинамические эффекты, возникающие при движении БПР.

В рамках полученных кибернетических моделей осуществляется синтез алгоритмов управления движением БПР с использованием методов оптимизации с учетом возможных возмущающих факторов, в условиях которых происходит функционирование БПР. Далее выполняется валидация алгоритмов управления движением БПР в рамках каждой ТОП на гидродинамической модели, по результатам которой возможна доработка кибернетических моделей и алгоритмов управления.

На основании разработанных ТОП определяются сценарии поведения, каждый из которых составляет заданную последовательность ТОП. В общем случае такой подход позволяет перейти от простых операций «движение вперед» и «разворот по курсу» к более сложным сценариям вида «движение в среде с препятствиями», на основании которых возможно выполнение целых миссий.

По результатам разработки алгоритмов управления поведением, который в простейшем случае может представлять собой конечный автомат, проводится валидация алгоритмов управления поведением на гидродинамической модели и в рамках натурных экспериментов.

Структурная схема, характеризующая предложенную методику модельно-ориентированного проектирования, представлена на рис. 1.

В последующих разделах работы приведен пример применения предложенной методики для решения задачи синтеза алгоритмов управления движением туниформного БПР.

Описание рассматриваемой конструкции БПР. В рамках данной работы рассматривалась типовая конструкция БПР туниформного типа с осцилляторным типом плавания, осуществляющая движение за счет поворота хвостовой части. При этом хвостовая часть которого обладает несколькими степенями подвижности в горизонтальной плоскости, что позволяет роботу осуществлять движение ею по параболической траектории.

На основании рассматриваемой конструкции была разработана редуцированная гидродинамическая численная модель, на основании которой в дальнейшем проводились вычислительные эксперименты и валидация разрабатываемых алгоритмов управления.

Внешний вид БПР с осцилляторным типом плавания и соответствующей ему гидродинамической модели приведен на рис. 2.

Как уже было сказано ранее, с целью упрощения процесса синтеза алгоритма управления, в рамках рассматриваемой математической модели предполагалось, что БПР осуществляет движение в соответствии с заданным паттерном движения. Для этого рассмотрим схему деформации гидродинамической модели движения БПР, представленную на рис. 3.

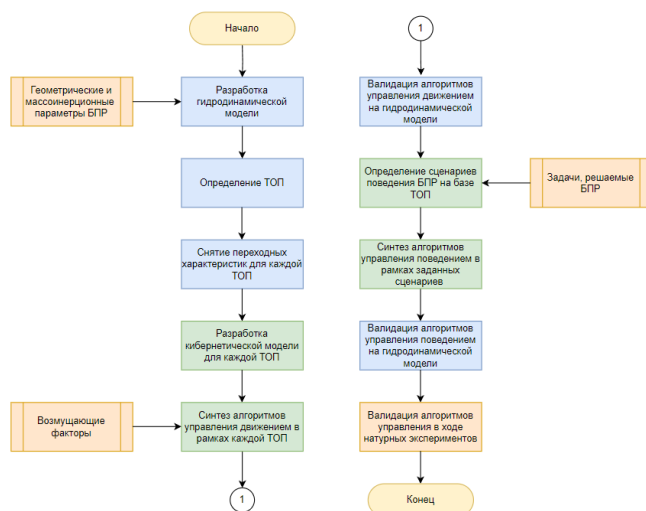


Рис. 1. Предложенная методика проектирования системы управления БПР



Рис. 2. Внешний вид туниморфного БПР (а) и соответствующей ему гидродинамической модели (б)

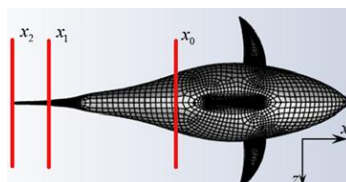


Рис. 3. Схема деформации гидродинамической модели движения БПР

Обозначения, используемые на рисунке: x_0 – продольная координата начального участка деформации первой хвостовой части туниморфного БПР, x_1 – продольная координата начального участка деформации второй части хвостового плавника БПР, x_2 – продольная координата конечного участка деформации хвостовой части БПР.

В качестве заданного паттерна движения для перемещения БПР выбран синусоидальный закон колебаний хвостовой части, представленный ниже:

$$\begin{cases} z(x, t) = A(x_0 - x)^2 \sin(2\pi vt) + \tan(\alpha) \cdot (x_0 - x), & x_0 \geq x \geq x_1 \\ z(x, t) = A(x_0 - x_1)^2 \sin(2\pi vt) - A_2(x_1 - x) \cos(2\pi vt + \Delta\varphi) + \\ + \tan(\alpha) \cdot (x_0 - x_1), & x_2 \geq x \geq x_1 \end{cases} \quad (1)$$

где z, x – координаты соответствующего участка хвостовой части; A, A_2 – амплитуда колебаний первого и второго участка хвостовой части БПР соответственно; v – частота колебаний хвостовой части БПР; α – угол отклонения плоскости колебаний относительно продольной оси симметрии БПР, $\Delta\varphi$ – заданное смещение фазы между колебанием первого и второго участков БПР.

В соответствии с представленным законом колебаний хвостовой части БПР (1) осуществляет колебание всей хвостовой частью по параболической траектории, при этом второй участок хвостовой части колеблется по линейной траектории, что позволяет в упрощенном виде воспроизвести реальное перемещение тунца.

Далее на основании представленной конструкции БПР были выделены следующие ТОП:

- ◆ движение в продольном направлении;
- ◆ плавный поворот по углу курса;
- ◆ быстрый поворот по углу курса;
- ◆ движение в вертикальном направлении.

Движение в продольном направлении (прямолинейное движение) реализуется путем колебаний хвостовой части с заданной амплитудой.

Плавный поворот по углу курса реализуется путем изменения плоскости колебания хвостовой части БПР относительно продольной оси симметрии, как показано на рис. 4,а. Это позволяет создать управляющий момент относительно вертикальной оси симметрии без снижения скорости прямолинейного движения БПР.

Быстрый поворот по углу курса реализуется путем смещения хвостовой части БПР в крайнее положение с дальнейшим прекращением колебаний, как показано на рис. 4,б. В такой конфигурации хвостовая часть БПР представляет собой аналог весла, замедляющего движение и разворачивающего туниморфного БПР.

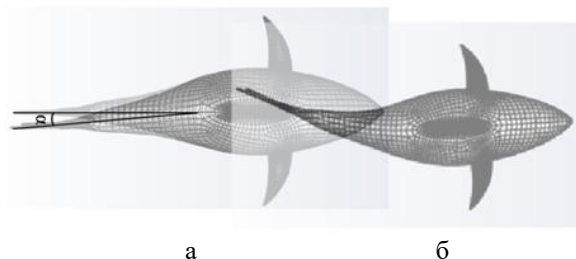


Рис. 4. Конфигурация БПР при плавном (а) и быстром (б) повороте по углу курса

Движение в вертикальном направлении может быть реализовано посредством изменения плавучести робота за счет вытеснения и набора воздуха или жидкости из корпуса робота, что аналогично принципу работы плавательного пузыря у реальных рыб.

Синтез кибернетической модели. Далее в соответствии с предложенной методикой для каждой из типовых операций необходимо было снять переходные процессы, характеризующие динамику движения БПР.

Для этого была проведена серия вычислительных экспериментов на гидродинамической модели с различными значениями управляющих воздействий, подаваемых на вход закона колебаний хвостовой части (1). Ниже отдельно рассмотрен синтез кибернетических моделей для движения по линейным и угловым координатам.

В качестве управляющего воздействия для продольного движения была выбрана частота колебаний хвостовой части в связи с тем, что изменение данного параметра физически реализуемо, а также легко интерпретируемо в рамках гидродинамической модели. При движении в вертикальном направлении в качестве управляющего воздействия была выбрана остаточная плавучесть БПР.

В результате проведенных экспериментов на гидродинамической модели было выявлено, что в общем случае динамика движения БПР как при движении в продольном направлении, так и в вертикальном направлении может быть описана в виде передаточной функции для скорости, представляющей собой инерционное звено первого порядка с переменными параметрами вида:

$$W(s, u) = \frac{K(u) \cdot u}{T(u)s + 1} \quad (2)$$

где u – соответствующее управляющее воздействие, s – оператор дифференцирования, K, T – параметры передаточной функции.

Несмотря на то, что классический подход теории автоматического управления предполагает использование передаточных функций с постоянными параметрами, представляющие собой систему линейных дифференциальных уравнений [15, 16], в случае с сильно нелинейным характером динамики БПР, данный подход не позволяет получить модель, обладающую достаточной точностью.

Для аппроксимации зависимостей $K(u)$ и $T(u)$ были использованы полиномы второй степени вида

$$C(u) = k_2 \cdot u^2 + k_1 \cdot u + k_0, \quad (3)$$

где k_0, k_1, k_2 – параметры аппроксимации C – название параметра.

Для поиска коэффициентов аппроксимации была использована оптимизация с использованием метода наименьших квадратов. Пример аппроксимации переходных процессов по линейной скорости движения БПР в вертикальном и продольном направлениях с использованием зависимости (2) приведен на рис. 5,а,б.

Для плавного разворота по курсу в качестве управляющего сигнала был выбран угол отклонения плоскости колебаний относительно продольной оси симметрии БПР α . При этом в ходе экспериментов также была выявлена корреляция между частотой колебаний хвостовой части и угловой скоростью БПР. При выполнении быстрого поворота по курсу управляющее воздействие является релейным и принимает значение «1», когда БПР переходит в режим выполнения ТОП и «0», когда данный ТОП не выполняется. Тем не менее также присутствует корреляция между угловой скоростью БПР и скоростью движения на момент перехода к выполнению ТОП.

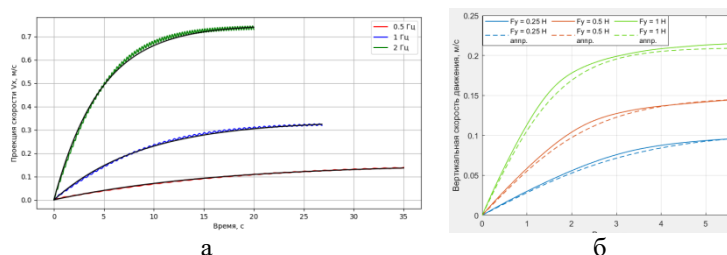


Рис. 5. Результаты аппроксимации зависимости продольной скорости движения $v_x(v, t)$ (а) и вертикальной скорости движения $v_y(F_y, t)$ (б)

Соответственно, для разработки кибернетической модели в ходе выполнения ТОП по повороту по углу курса была также исследована зависимость угловой скорости от линейной скорости движения и частоты колебаний хвостовой части, которые в полной мере не являются управляющими воздействиями при выполнении данных ТОП, но оказывают значительное на них влияние.

Пример графиков, полученных в ходе численных экспериментов на гидродинамической модели приведен на рис. 6.

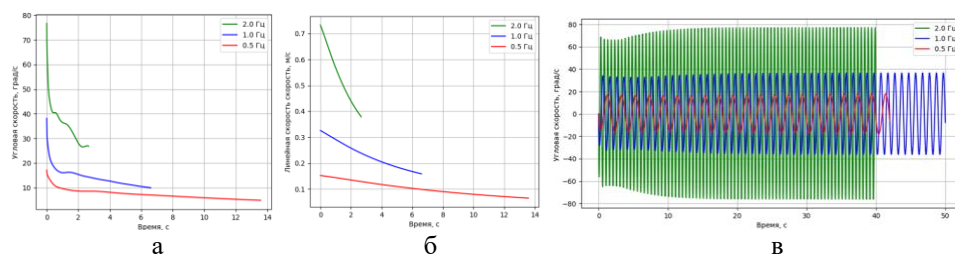


Рис. 6. Графики переходного процесса по угловой (а) и линейной (б) скорости при выполнении ТОП «быстрый поворот», а также по угловой скорости и $\alpha = 2^\circ$ (а) при выполнении ТОП «плавный поворот» (в)

Исходя из полученных графиков можно сделать вывод, что при быстром повороте у БПР возникает мгновенная угловая скорость по углу курса, которая, тем не менее, ведет к мгновенному уменьшению скорости линейного движения. При выполнении операции «плавный поворот» БПР совершает колебания по угловой скорости, обусловленную колебательным характером движения по углу курса. При этом амплитуда колебаний зависит от частоты и в значительной степени превышает полезный сигнал, на основании которого возможно проанализировать среднее значение угловой скорости.

По этой причине исходные данные были отфильтрованы фильтром низких частот с целью выделения полезного сигнала, в результате чего были получены графики переходных процессов по угловой скорости для различных значений управляющих воздействий, представленные на рис. 7.

Исходя из полученных графиков (рис. 6, 7) можно сделать вывод, что переходные процессы по углу курса не описываются с использованием типовых звеньев ТАУ, в результате чего в данной работе было предложено использовать комбинацию звеньев. В частности, для описания динамики угловой скорости БПР по углу курса при выполнении ТОП «плавный поворот» была использована комбинация из трех типовых звеньев: двух дифференциальных и одного апериодического с переменными параметрами вида:

$$W(s, v, \alpha) = K_\varphi(v, \alpha) \left(\frac{1}{T_1(v, \alpha)^2 s^2 + T_2(v, \alpha)s + 1} + \frac{K_d(v, \alpha)s}{T_d s + 1} - \frac{K_d(v, \alpha)s}{T_d s + \gamma} \right) \quad (4)$$

где $T_1, T_2, K_d, T_d, \gamma, K_\varphi$ – параметры звена.

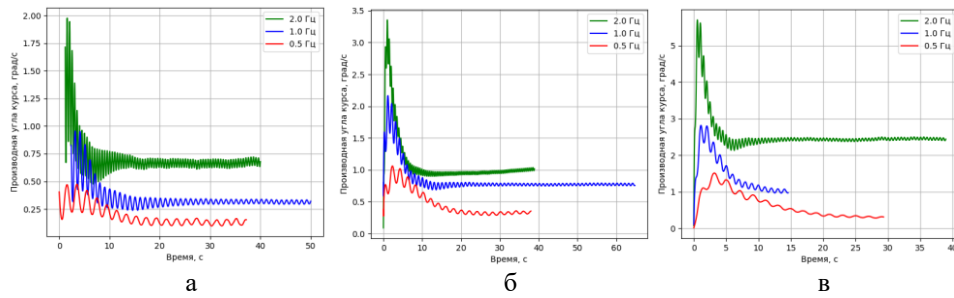


Рис. 7. Графики отфильтрованной угловой скорости при выполнении ТОП «плавный разворот» при $\alpha = 2^\circ$ (а), 5° (б) и 7° (в)

Постоянные параметры данной функции (γ, T_d) были определены методом оптимизации, исходя из предположения, что остальные параметры тоже являются постоянными. Для аппроксимации переменных параметров (T_1, T_2, K_d, K_φ) были использованы функциональные зависимости второй степени вида:

$$C(\alpha, v) = k_{20}\alpha^2 + k_{10}\alpha + k_0 + k_{11}v\alpha + k_{01}v + k_{02}v^2, \quad (5)$$

где $k_{20}, k_{10}, k_0, k_{11}, k_{01}, k_{02}$ – параметры аппроксимации.

Представленный нелинейный аналог комбинации типовых передаточных функций (4) позволил упрощенно представить динамику БПР при повороте по углу курса с довольно высокой точностью. Примеры аппроксимации угловой скорости в рамках выполнения ТОП «плавный поворот» приведены на рис. 8, а, б.

При выполнении ТОП «быстрый поворот» в связи с характерно наблюдаемыми участками мгновенного и плавного изменения угловой скорости (рис. 6) динамика изменения угловой скорости была описана в виде:

$$\omega_y(t, v_0^x) = \begin{cases} t < t_d(v_0^x), & \omega_0^y(v_0^x) - K_\omega(v_0^x) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1(v_0^x)}} \right) \\ t \geq t_d(v_0^x), & \left(\omega_0^y(v_0^x) - K_\omega(v_0^x) \right) \cdot e^{-\frac{t_d(v_0^x) - t}{T_2(v_0^x)}} \end{cases}, \quad (6)$$

где t – время с начала ТОП, v_0^x – скорость движения в продольном направлении в момент начала ТОП, ω_y – угловая скорость поворота по курсу, t_d – время перехода с режима мгновенного изменения скорости на режим плавного изменения скорости, ω_0^y – угловая скорость по курсу в момент начала ТОП, K_ω, T_1, T_2 – параметры, характеризующие динамику БПР.

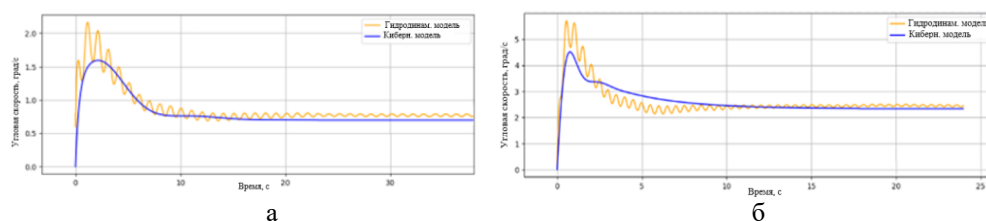


Рис. 8. Результаты аппроксимации зависимости угловой скорости $\omega(\alpha, \nu, t)$ в ходе выполнения ТОП «плавный поворот» при $\alpha = 5^\circ, \nu = 1$ Гц (а), $\alpha = 7^\circ, \nu = 2$ Гц (б)

Параметры нелинейного динамического звена (6) также были аппроксимированы на основании проведенных гидродинамических экспериментов. Так, функциональные зависимости $\omega_0^y(v_0^x), K_\omega(v_0^x)$ были аппроксимированы в виде полинома второго порядка (3). Функциональные зависимости $K_\omega(v_0^x), T_1(v_0^x)$ и $T_2(v_0^x)$, в свою очередь, были аппроксимированы гиперболической зависимостью вида:

$$C(v_0^x) = \frac{k_{hyp}}{v_0^x + \gamma_{hyp}}, \quad (7)$$

где k_{hyp}, γ_{hyp} – параметры гиперболической аппроксимации.

Пример аппроксимации зависимости угловой скорости в рамках выполнения ТОП «быстрый поворот» приведен на рис. 9.

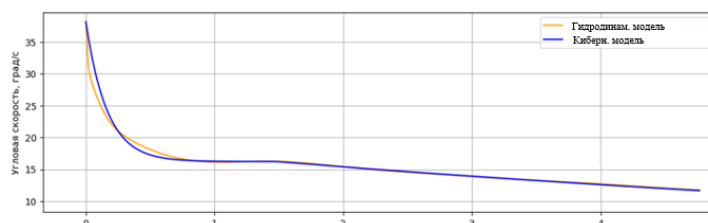


Рис. 9. Результаты аппроксимации зависимости угловой скорости $\omega(v_0^x, t)$ в ходе выполнения ТОП «быстрый поворот» при начальной линейной скорости 0,7 м/с

Синтез и апробация алгоритмов управления движением БПР. На основании приведенной выше кибернетической модели был проведен синтез алгоритмов управления для каждой из ТОП с учетом особенностей движительно-рулевого комплекса туннормального БПР.

При управлении движением в продольном направлении принципиальными становятся вопросы обеспечения управляемости в условиях ограничений на максимальную частоту колебаний хвостовой части (составляющей для выбранной конструкции 2 Гц) и переменную дискретность управления, определенную заданным паттерном движения. В частности, в процессе синтеза алгоритма управления необходимо было учесть, что частоту колебаний хвостовой части можно менять только в момент перехода оси колебаний, в противном случае возникает нежелательный возмущающий момент по курсу. При синтезе алгоритма управления для ТОП «плавный поворот», в свою очередь, необходимо было учесть влияние частоты колебаний на величину угловой скорости.

С учетом данных ограничений был проведен структурный и параметрический синтез алгоритмов управления. Для управления движением в продольном и вертикальном направлениях с учетом кибернетической модели динамики (2) был выбран классический ПИ-регулятор по скорости. Для управления движением в ходе выполнения операции «быстрый разворот» был выбран релейный регулятор. Для управления поворотом по углу курса в ходе выполнения ТОП «быстрый разворот» был реализован модифицированный нелинейный ПД-регулятор вида

$$u = K_p(v)e + K_d\dot{e}, \quad (8)$$

где v – частота колебаний хвостовой части; K_p, K_d – параметры ПД-регулятора; u – управляющее воздействие регулятора; e – ошибка регулирования.

В данном случае нелинейная зависимость $K_p(v)$, позволяющая учесть взаимосвязь между контурами управления была представлена в виде кусочно-линейной зависимости, параметры которой были определены в ходе оптимизации алгоритмов управления. Оптимизация выполнялась с учетом нелинейных ограничений на управление в соответствии с классическим функционалом оптимизации вида [17, 18]:

$$f(e, t) = qe(t)^2 + ru(t)^2, \quad (9)$$

где q, r – весовые параметры оптимизации, назначенные пользователем.

В связи с тем, что объект управления даже в рамках кибернетической модели описывается сильно нелинейными зависимостями оптимизация выполнялась стохастическим методом с использованием роя частиц [19, 20]. В результате для каждой ТОП был определен соответствующий вектор параметров регуляторов в рамках кибернетической модели, после чего была произведена апробация полученных алгоритмов управления в рамках гидродинамической модели при ступенчато заданных параметрах скоростей и угла курса.

Результат апробации алгоритмов управления для каждой ТОП приведен на рис. 10. Для ТОП «быстрый разворот» в связи с релейным характером регулятора результата апробации аналогичен рис. 9, в связи с чем в данном случае не приводится.

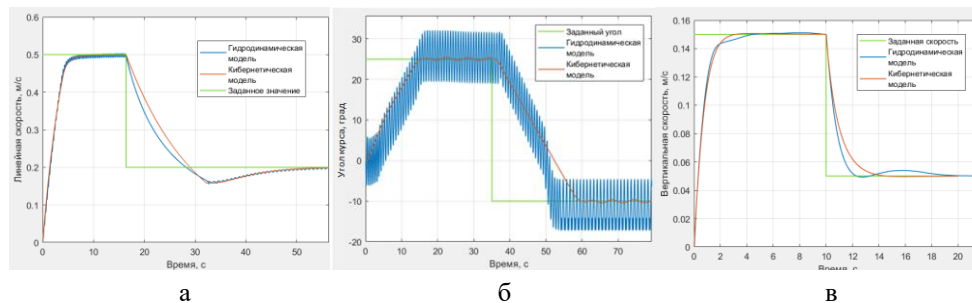


Рис. 10. Результат апробации алгоритмов управления в рамках ТОП «движение в продольном направлении» (а), «плавный поворот по курсу» (б), «движение в вертикальном направлении» (в)

Заключение. В рамках данной работы приведена методика модельно-ориентированного проектирования системы управления движением БПР. Элементами новизны предложенного решения по сравнению с известными подходами к проектированию системы управления движением БПР является комплексное применение гидродинамических и кибернетических моделей в процессе синтеза алгоритмов управления.

На примере синтеза алгоритмов управления движением туниморфного БПР продемонстрирована эффективность предложенной методики в ходе описания динамики движения БПР и проектирования системы управления.

Основным преимуществом предложенной методики является возможность проектирования системы управления на стадии разработки конструкции БПР, что позволяет значительно ускорить процесс их проектирования, а также повысить качество работы системы. К недостатку предложенной методики можно отнести необходимость выбора

паттерна движения для определения ТОП, что может ограничивает функциональность БПР, однако обеспечивает устойчивость движения. В рамках дальнейших работ планируется апробация предложенной методики в ходе проектирования системы управления поведением БПР, а также анализ применимости предложенной методики для управления БПР с ундуляторным типом плавания.

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-00553-25-00 от 25.12.2024 «Развитие теории модельно-ориентированного проектирования для задач создания трансформных робототехнических систем с использованием методов вычислительной механики и гидрогазодинамики» (FNRG-2025-0005 1024042600099-7-2.2.2;1.2.1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Xiaofeng Z. et al. Review of research and control technology of underwater bionic robots // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – P. 1-28.
2. Fossen T.I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. – Hoboken, NJ: Wiley, 2021. – 736 с.
3. Pshikhopov V., Gurenko B., Shapovalov I., Beresnev M. Development and research of path-planning module for control system of underwater vehicle // Internation Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2016. – Vol. 5, No. 4. – P. 301-304.
4. Пантов Е.Н., Махнин Н.Н., Шереметов Б.Б. Основы теории движения подводных аппаратов. – Л.: Судостроение, 1973. – 216 с.
5. Gong Y. et al Investigating the Influence of Counter-flow Regions on the Hydrodynamic Performance of Biomimetic Robotic Fish // Biomimetics. – 2024. – Vol. 9, No. 425. – P. 1-19.
6. Yan X., Ma Y. A Distributed Control Method for Flexible Robotic Fish Based on PDE // IET Control Theory and Applications. – 2023. – Vol. 17. – P. 1930-1943.
7. Щур Н.А., Половко С.А., Деулин А.А. Применение методов вычислительной гидродинамики для получения характеристик переходных процессов АНПА // Робототехника и техническая кибернетика. – 2020. – Т. 8, №4. – С. 287-295.
8. Ламб Г. Гидродинамика. – М.: ОГИЗ, 1947. – 929 с.
9. Kastalsky I.A., Gordleeva S.Y., Hramov A.E., Kasantsev V.B. Bridging nonlinear dynamics and physiology: implications for CPGs and biomimetic robotics. Reply to comments on “control of movement of underwater swimmers: animals, simulated animates and swimming robots” // Physic of life reviews. – 2024. – Vol. 50. – P. 32-34.
10. Cafer Bal et. al. CPG-based autonomous swimming control for multi-tasks of a biomi-metic robotic fish // Ocean Engineering. – 2019 – Vol. 189. – P. 1-24.
11. Ijspeert A. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review // Neural Networks. – 2008. – Vol. 21, Iss. 4. – P. 642-653.
12. Buşoniu L. et al. Reinforcement Learning for Control: Performance, Stability, and Deep Approximators // Annual Re-views in Control. – 2018. – Vol. 46. – P. 8-28.
13. Xiaozhu L., Xiaopei L., Yang W. Learning Agile Swimming: An End-to-End Approach without CPGs // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2025. – P. 1-8.
14. Jingdong L., Lynne E., Raj M. Reinforcement Learning for Autonomous Robotic Fish // Studies in Computational Intelligence – 2007. – Vol. 50. – P. 121-135.
15. Горюнов В.В., Половко С.А., Щур Н.А. Технология создания кибернетических моделей для синтеза и отработки регуляторов системы управления движением автономного необитаемого подводного аппарата // Робототехника и техническая кибернетика. – 2020. – Т. 8, № 4. – С. 308-318.
16. Юревич Е. И. Теория автоматического управления. – Л.: Энергия, 1975. – 413 с.
17. Kwakernaak H., Sivan R. Linear Optimal Control Systems. – 1st ed. – New York: Wiley-Interscience, 1972. – 608 с.
18. Reshmi K.R., Priya P.S. Design and Control of Autonomous Unerwater Vehicle for Depth Control Using LQR Controller // International Journal of Science and Research. – 2016. – Vol. 5, Iss. 7. – P. 1432-1436.
19. Poli R. Analysis of the Publications on the Applications of Particle Swarm Optimisation // Journal of Artificial Evolution and Applications. – 2008. – Vol. 2008. – P. e685175.
20. Avriel M. Nonlinear Programming: Analysis and Methods. Nonlinear Programming. – Eaglewood Cliffs: Prentice-Hall Inc., 2003. – 548 p.

REFERENCES

1. Xiaofeng Z. et al. Review of research and control technology of underwater bionic robots, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, pp. 1-28.
2. Fossen T.I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Hoboken, NJ: Wiley, 2021, 736 p.
3. Pshikhov V., Gurenko B., Shapovalov I., Beresnev M. Development and research of path-planning module for control system of underwater vehicle, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2016, Vol. 5, No. 4, pp. 301-304.
4. Pantov E.N., Makhinin N.N., Sheremetov B.B. Osnovy teorii dvizheniya podvodnykh apparatov [Fundamentals of the theory of movement of underwater vehicles]. Leningrad: Sudostroenie, 1973, 216 p.
5. Gong Y. et al Investigating the Influence of Counter-flow Regions on the Hydrodynamic Performance of Biomimetic Robotic Fish, *Biomimetics*, 2024, Vol. 9, No. 425, pp. 1-19.
6. Yan X., Ma Y. A Distributed Control Method for Flexible Robotic Fish Based on PDE, *IET Control Theory and Applications*, 2023, Vol. 17, pp. 1930-1943.
7. Shchur N.A., Polovko S.A., Deulin A.A. Primenenie metodov vychislitel'noy gidrodinamiki dlya polucheniya kharakteristik perekhodnykh protsessov ANPA [Application of computational fluid dynamics methods to obtain characteristics of AUV transient processes], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical cybernetics], 2020, Vol. 8, No. 4, pp. 287-295.
8. Lamb G. Gidrodinamika [Hydrodynamics]. Moscow: OGIz, 1947, 929 p.
9. Kastalsky I.A., Gordleeva S.Y., Hramov A.E., Kasantsev V.B. Bridging nonlinear dynamics and physiology: implications for CPGs and biomimetic robotics. Reply to comments on "control of movement of underwater swimmers: animals, simulated animates and swimming robots", *Physic of life reviews*, 2024, Vol. 50, pp. 32-34.
10. Cafer Bal et. al. CPG-based autonomous swimming control for multi-tasks of a biomi-metic robotic fish, *Ocean Engineering*, 2019, Vol. 189, pp. 1-24.
11. Ijspeert A. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review // *Neural Networks*. – 2008. – Vol. 21, Iss. 4 – P.642-653.
12. Buşoniu L. et al. Reinforcement Learning for Control: Performance, Stability, and Deep Approximators, *Annual Re-views in Control*, 2018, Vol. 46, pp. 8-28.
13. Xiaozhu L., Xiaopei L., Yang W. Learning Agile Swimming: An End-to-End Approach without CPGs, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2025, pp. 1-8.
14. Jingdong L., Lynne E., Raj M. Reinforcement Learning for Autonomous Robotic Fish, *Studies in Computational Intelligence*, 2007, Vol. 50, pp. 121-135.
15. Goryunov V.V., Polovko S.A., Shchur N.A. Tekhnologiya sozdaniya kiberneticheskikh modeley dlya sinteza i otrabotki regulyatorov sistemy upravleniya dvizheniem avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Technology of creating cybernetic models for the synthesis and testing of controllers for the motion control system of an autonomous unmanned underwater vehicle], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical cybernetics], 2020, Vol. 8, No. 4, pp. 308-318.
16. Yurevich E.I. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control]. Leningrad: Energiya, 1975, 413 p.
17. Kwakernaak H., Sivan R. Linear Optimal Control Systems. 1st ed. New York: Wiley-Interscience, 1972, 608 p.
18. Reshmi K.R., Priya P.S. Design and Control of Autonomous Unerwater Vehicle for Depth Control Using LQR Controller, *International Journal of Science and Research*, 2016, Vol. 5, Iss. 7, pp. 1432-1436.
19. Poli R. Analysis of the Publications on the Applications of Particle Swarm Optimisation, *Journal of Artificial Evolution and Applications*, 2008, Vol. 2008, pp. e685175.
20. Avriel M. Nonlinear Programming: Analysis and Methods. Nonlinear Programming. Eaglewood Cliffs: Prentice-Hall Inc., 2003, 548 p.

Смирнова Екатерина Юрьевна – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: eus@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89214401814; зам. руководителя научно-исследовательского центра.

Серов Данила Константинович – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: d.serov@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89110804189; аспирант; инженер 911 лаборатории «Численного моделирования».

Пельменев Денис Кириллович – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: d.pelmenev@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89084423980; техник 1 категории 911 лаборатории «Численного моделирования».

Коренко Никита Павлович – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: n.korenko@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89215922140; инженер 911 лаборатории «Численного моделирования».

Никулина Анастасия Юрьевна – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: a.nikulina@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89112294800; техник первой категории 931 СКТБ.

Smirnova Ekaterina Yurievna – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: eus@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79214401814; deputy head of the Research Center.

Serov Danila Konstantinovich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: d.serov@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79110804189; postgraduate student; engineer of 911 laboratory of “Digital simulation”.

Pelmenev Denis Kirillovich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: d.pelmenev@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79084423980; technician of the 1st category of 911 laboratory of “Digital simulation”.

Korenko Nikita Pavlovich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: n.korenko@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79215922140; engineer of 911 laboratory of “Digital simulation”.

Nikulina Anastasiya Yurievna – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: a.nikulina@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79112294800; technician of the 1st category of 931 SDB.

УДК 28.23.24: 28.23.27: 004.82

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-129-140

С.М. Соколов, А.А. Богуславский

МЕТОДИКА И ПРАКТИКА ПОВЫШЕНИЯ АВТОНОМНОСТИ НАЗЕМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Тенденции развития современной робототехники и потребности практики требуют повышения степени автономности робототехнических комплексов. Повышение степени автономности, в свою очередь, требует увеличения ситуационной осведомлённости и, как следствие, увеличение объёма данных и эффективности их обработки в масштабе реального времени на бортовых ресурсах. При этом сохраняется требование экономической целесообразности предлагаемых решений. С учётом того, что в отечественной практике в большинстве случаев используются телеуправляемые роботы, возникает необходимость наращивания их автономности, с использованием уже имеющихся технических решений. Такое направление развития робототехнических комплексов называется переходом от телеуправления к супервизорному управлению. На этом пути осуществляется передача всё большего количества информационно-управляющих функций от оператора к бортовой информационно-управляющей системе. На основе анализа мирового и собственного опыта разработок робототехнических комплексов, авторской методики создания роботов с повышенной степенью автономности, нами выделен ключевой элемент обеспечения интеллектуальной автономности мобильных средств. Предложен унифицированный программно-аппаратный модуль информационного обеспечения мобильных роботов. Основу модуля образует система технического зрения с открытой программно-аппаратной архитектурой. Этот модуль позволяет наращивать степень автономности наземных робототехнических комплексов в части интеллектуальной автономности постепенно, оставаясь в рамках экономической целесообразности. Открытая программная архитектура модуля учитывает имеющееся де-факто разнообразие аппаратных решений в существующих телеуправляемых подвижных средствах и позволяет производить увеличение степени автономности – переходить от режима телеуправления к супервизорному управлению пошагово, сообразно решаемым задачам и доступным средствам. Предлагается методика создания новых или реинжиниринга уже существующих образцов РТК. Методика включает анализ общей компоновки РТК с акцентом на программно-алгоритмическую часть бортовой информационно-управляющей системы. При этом учитываются условия согласования требований к сенсорной и вычислительной частям. В работе рассмотрены примеры применения этой методики к усовершенствованию уже существующих образцов наземных РТК. Приводятся постановки практических задач и примеры их решения с помощью предлагаемого модуля.

Автономность роботов; степень автономности; информационное обеспечение; система технического зрения; интеллектуальная автономность; унификация решений в области автономии.

S.M. Sokolov, A.A. Boguslavsky

METHODOLOGY AND PRACTICE OF INCREASING THE AUTONOMY OF GROUND-BASED ROBOTIC COMPLEXES

Trends in the development of modern robotics and the needs of practice require an increase in the degree of autonomy of robotic complexes. Increasing the degree of autonomy, in turn, requires an increase in situational awareness and, as a result, an increase in the volume of data and the efficiency of their processing in real time on on-board resources. At the same time, the requirement of economic feasibility of the proposed solutions remains. Taking into account the fact that in domestic practice, in most cases, remote-controlled robots are used, it becomes necessary to increase their autonomy using existing technical solutions. This direction of development of robotic complexes is called the transition from remote control to supervisory control. Along this path, an increasing number of information management functions are transferred from the operator to the on-board information management system. Based on the analysis of the world and our own experience in the development of robotic complexes, the author's methodology for creating robots with an increased degree of autonomy, we have identified a key element in ensuring the intellectual autonomy of mobile devices. A unified software and hardware module for information support of mobile robots is proposed. The module is based on a vision system with an open software and hardware architecture. This module allows increasing the degree of autonomy of ground-based robotic complexes in terms of intellectual autonomy gradually, while remaining within the framework of economic feasibility. The open software architecture of the module takes into account the de facto variety of hardware solutions in existing remote-controlled mobile vehicles and allows for an increase in the degree of autonomy - to switch from remote control mode to supervisory control step by step, according to the tasks being solved and the available means. A technique for creating new or reengineering existing RTK samples is proposed. The methodology includes an analysis of the overall layout of the RTK with an emphasis on the software and algorithmic part of the on-board information and control system. This takes into account the conditions for matching the requirements for the sensor and computing parts. The paper considers examples of the application of this technique to the improvement of existing samples of ground-based RTCs.. Practical tasks and examples of their solution using the proposed module are presented.

Robot autonomy; degree of autonomy; information support; vision system; intellectual autonomy; unification of solutions in the field of autonomy.

Введение. Одной из тенденций в развитии современной подвижной робототехники является переход от телеуправления к автономным беспилотным средствам. Эта тенденция в перспективе должна привести к созданию технических систем, которые могут воспринимать, понимать и взаимодействовать с окружающей средой, а также развиваться для достижения результатов, подобных человеческим, в деятельности, требующей знаний, специфичных для контекста (ситуации и задачи). Признано, что достижение таких возможностей выходит за рамки современного уровня техники и будет оставаться таковым в течение многих лет. Особенно сложной является ситуация в наземной робототехнике, т.к. объём необходимой информации и частота выработки управляющих воздействий для реализации целенаправленных перемещений особо высоки для наземных систем, осуществляющих перемещение в заранее неопределённых условиях. Исходя из этого видения, европейским научным сообществом было определено несколько промежуточных целей [1]. В существующих НРТК ситуационная осведомлённость, необходимая для функционирования, обеспечивается оператором, дистанционно снабжаемым данными о текущей ситуации (это режим телеуправления). В перспективном НРТК с повышенной степенью автономности (ПСА) ситуационную осведомлённость должны обеспечивать бортовые информационные системы (ИС) и системы технического зрения (СТЗ) как их центральная часть. Чем больше задач и чем более сложные задачи ситуационной осведомлённости возлагаются на бортовую ИС, тем большей степенью интеллектуальной автономии обладает соответствующий НРТК. Анализ существующей практики показывает, что стоимость дооснащения каждого из уже существующих типов подвижных платформ своей персонифицированной системой информационного обеспечения существенно удорожает весь РТК и тормозит движение на пути повышения степени автономности РТК. Опыт наших исследований и разработок в области информационного обеспечения робототехнических систем позволил выделить ключевые моменты в формировании программно-аппаратных информационных комплексов и разработать унифицированный информационный модуль, на основе СТЗ, который может быть оперативно включен в состав уже существующих подвижных платформ,

функционирующих в режиме телеуправления и обеспечит переход от телеуправления к супервизорному управлению эффективно с точки зрения стоимости (использовать существующие средства), с возможностью постепенного наращивания степени автономности. В этой работе мы предлагаем методический подход к анализу существующих или созданию новых наземных РТК с ПСА и приводим примеры использования и реализации этой методики для повышения степени автономности наземных РТК с помощью предложенного унифицированного информационного модуля.

Методика анализа системы информационного обеспечения РТК. В нашей практике для анализа имеющихся решений и разработки новых робототехнических комплексов мы используем так называемое конфигурационное пространство [2]. В этом пространстве (рис. 1) укрупнённо представлены основные компоненты, определяющие состав и функционал информационной системы РТК. Такое рассмотрение позволяет сделать конструктивно обозримым большое количество взаимосвязанных технологий, используемых при создании РТК, и постепенно наращивать возможности уже существующих РТК.

Степень автономности, метрики для которой задаются в так называемом пространстве автономии, предложенном и развитом группой ALFUS в США [3–8] (рис. 2), хорошо согласуется с рассмотрением плоскости модели – алгоритмы введённого нами конфигурационного пространства. Сложность окружения определяется по оси моделей заданием модели (описанием свойств) окружающего пространства, в котором необходимо функционировать РТК, Сложность миссии определяется постановкой задачи перед РТК. Зависимость от оператора – пропорцией, распределением алгоритмов решения поставленной задачи между бортовой информационно-управляющей системой и оператором.

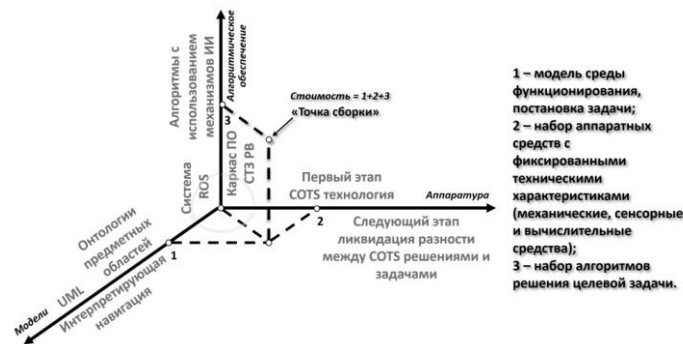


Рис. 1. Пространство конфигураций/архитектур систем информационного обеспечения робототехнических комплексов с указанием ряда технологий, используемых при определении, задании координат по осям этого пространства



Рис. 2. Показатели для определения уровня автономности, предложенные группой ALFUS («пространство автономии»)

Укажем два возможных варианта анализа, выбора вариантов решения задачи с использованием конфигурационного пространства.

Первый – разработка информационной системы для нового РТК («с нуля»). В этом варианте рассмотрение начинается с оси моделей, по которой формируется постановка целевой задачи, далее, по оси аппаратуры фиксируются имеющиеся, доступные средства аппаратной поддержки (регистрирующая аппаратура, вычислительные средства, каналы связи и т.п.). После этого в последовательном рассмотрении плоскостей модели – алгоритмы и алгоритмы – аппаратура, по оси алгоритмов фиксируются отрезки возможных алгоритмических решений бортовыми средствами.

Второй – развитие, доработка существующего телеуправляемого РТК с целью повышения степени автономности. В этом варианте рассмотрение начинается с плоскости модели – алгоритмы и фиксации на оси алгоритмов соотношения борт/оператор – доли алгоритмического обеспечения, выполняемой бортовой информационно-управляющей системой (БИУС) по отношению к алгоритмам, реализуемым оператором. Здесь же указывается желаемая величина этого отношения или перечисление тех алгоритмов, которые необходимо передать БИУС на пути повышения степени автономности рассматриваемого РТК. После этого рассматривается плоскость алгоритмы – аппаратура с целью определения какие аппаратные средства потребуются для реализации желаемых алгоритмов на борту. И в одном, и в другом варианте после фиксации координат или отрезков по осям конфигурационного пространства определяется стоимость соответствующих точек сборки и необходимые временные и другие ресурсы.

Унифицированный информационный модуль для наземных робототехнических комплексов с повышенной степенью автономности. Основой разработанного модуля является унифицированный каркас программного обеспечения (ПО) систем технического зрения реального времени, подробно описанный в [9–11]. Разработка каркасов ПО для решения задач определенного класса является распространенной практикой, в частности, в области автовождения на дорогах общего пользования [12–17].

Рассматриваемый каркас ПО СТЗ предназначен для упрощения процесса разработки ПО СТЗ реального времени посредством повторного использования решений однотипных задач обработки зрительных данных. Однотипные задачи были выделены в результате анализа опыта проектирования и разработки прикладных СТЗ. Каркас ПО СТЗ содержит повторно используемые программные компоненты в виде классов и их наборов (подсистем). Этот каркас используется в качестве заготовки для разработки новых СТЗ и дополняется компонентами, спроектированными применительно к решению конкретной прикладной задачи. Каркас ПО СТЗ представляет собой программу, обеспечивающую ввод зрительных данных от различных источников и передачу этих данных на программную обработку, которая реализуется с учетом требований конкретной задачи. Ряд программных компонент характеризуются высокой степенью повторного использования. К ним относятся компоненты, связанные с организацией ввода и зрительных данных, а также с представлением этих данных, промежуточных и окончательных результатов их обработки.

В целом, под программным каркасом понимается многократно используемая ведущая часть программы, которая в соответствии с программной логикой при необходимости обращается к различным модулям (в т.ч. повторно используемым) для решения частных подзадач. В таком случае при разработке конкретной программы разработчику необходимо заново написать лишь некоторые из модулей, заполняющих предусмотренные места готового каркаса. Применение программных каркасов при решении однотипных задач направлено на повышение степени повторного использования (как на уровне проектирования, так и на уровне реализации), упрощения модификации ПО, сокращения времени разработки и усилий в области поддержки разработанного ПО. Следует отметить следующие основные достоинства применения каркасов при разработке ПО на основе объектно-ориентированного подхода [18, 19]:

- ♦ Обеспечение модульности – модульность ПО обеспечивается за счет скрывания деталей реализации устойчивых интерфейсов. Таким образом удается локализовать влияние прогнозируемых изменений на этапах проектирования и реализации ПО. Эта локализация упрощает поддержку разработанного ПО.

♦ Повторная используемость – за счет построения общих компонентов, которые без изменений могут использоваться в новых приложениях, а также за счет использования готовой архитектуры с предопределенным поведением компонентов ПО.

♦ Расширяемость – в каркасе явно предусматриваются точки роста, позволяющие приложениям расширять функциональность с использованием устойчивых интерфейсов. Эти точки роста позволяют отделить устойчивые интерфейсы и поведение системы от изменяемых частей, которые требуется разработать для приложений в конкретных задачах.

♦ Инверсия программного управления – архитектура каркаса на этапе выполнения имеет свойство инверсии управления. Это архитектурное решение характеризуется тем, что добавляемые модули содержат обработчики событий, которые вызываются каркасом, непосредственно реагирующим на возникающие события. Когда возникает какое-либо событие, диспетчер в каркасе вызывает соответствующий обработчик или цепочку обработчиков. Таким образом, добавляемые модули не реагируют непосредственно на возникающие события, что позволяет диспетчеру каркаса выполнять обработку событий с использованием цепочек не связанных между собой модулей.

Каркас ПО СТЗ представляет собой программу, обеспечивающую основные действия СТЗ рассматриваемых категорий. В каркасе ПО определены набор абстрактных классов, общая для рассматриваемых СТЗ реального времени программная архитектура, общее поведение, общие структуры данных и общий интерфейс пользователя. Кроме наборов классов в каркасе предусмотрена и реализована определенная модель взаимодействия объектов этих классов. Эта модель реализована так, что в ней предусмотрены места для добавления новых компонентов – «точки роста» программной системы. Таким образом, каркас ПО СТЗ включает в себя реализованные типичные подсистемы ПО СТЗ, содержащие как окончательно реализованные объекты классов, так и объекты, которые должны быть доработаны с учетом требований конкретной прикладной задачи.

В качестве аппаратной составляющей рассматривается формируемая под задачу комбинация регистрирующих блоков (РБ) и вычислительно-управляющих блоков (ВУБ). На рис. 3 представлен пример схемы компоновки аппаратной части модуля.

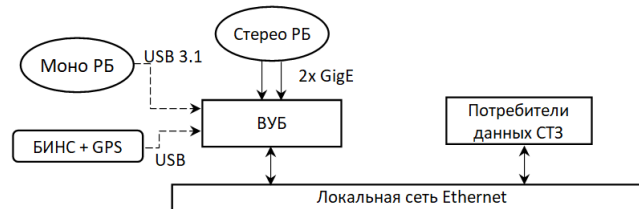


Рис. 3. Пример аппаратной компоновки информационного модуля для решения задач информационного обеспечения целенаправленных перемещений – определения траектории движения и определения положения платформы относительно полосы движения и информационного обеспечения полезной нагрузки – определение направления движения на ориентир и сопровождение объекта интереса

На рис. 4 и 5 показаны примеры результатов обработки зрительных данных в информационных модулях, выполняющих определение движения на ориентир и сопровождение объекта интереса.

Унифицированные информационные модули, создаваемые на основе описанного программного каркаса, позволяют оперативно выбирать и настраивать аппаратную часть СТЗ для конкретной подвижной платформы или РТК, учитывая желаемую степень автономности и стоимость предлагаемых решений. Характеристики регистрирующих блоков (РБ) (видеокамер с объективами) и мощность вычислительно-управляющих блоков (ВУБ) хорошо (пропорционально) согласуются с обеспечиваемой степенью автономности, характеризуемой как доля алгоритмического обеспечения в решении всей поставленной задачи, выполняемая бортовыми средствами. Здесь же просматривается корреляция стоимости предлагаемых решений и степени автономности, более подробно эти соотношения опишем на примерах в следующей части.



Рис. 4. Пример обработки изображения информационным модулем обеспечения движения на ориентир (отмечен крестообразным маркером).
Изображения взято из набора данных [20]



Рис. 5. Пример обработки изображения информационным модулем сопровождения объекта интереса (отмечена рамкой). Изображения взято из набора данных [21]

В табл. 1 приведены характеристики основных комплектующих минимальной и расширенной комплектации ВУБ в составе информационных модулей. Минимальная комплектация предназначена для решения задач информационного обеспечения с использованием монокулярного РБ, расширенная – с использованием монокулярного и стерео РБ.

Таблица 1

Характеристики минимальной и расширенной комплектации ВУБ в составе информационных модулей

Наименование комплектующих	Минимальная комплектация	Расширенная комплектация
Процессор	Четырёхъядерный, тактовая частота 3 ГГц (пример: Intel N100)	Восьмиядерный, 4 ГГц (пример: Intel i7 13700)
Оперативная память	16 Гб	32 Гб
Накопители	1 Тб для общего и специального ПО	1 Тб для общего и специального ПО, 2 Тб для хранения зрительных данных
Коммуникационные каналы	Gigabit Ethernet – 1 шт., USB 3.0 – 1 шт.	Gigabit Ethernet – 2 шт., USB 3.0 – 1 шт.

Для использования ВУБ на базе отечественных микропроцессоров семейства «Эльбрус» [22] в качестве базового процессора желательно использование Эльбрус-16С для минимальной комплектации и Эльбрус-32С для расширенной комплектации (с целью компенсации пониженной тактовой частоты, по сравнению с характеристиками в таблице, за счет количества доступных ядер).

Информационные модули, построенные на основе описанного каркаса, легко сопрягаются, встраиваются в системы управления существующих РТК, построенных на принципах ROS. На рис. 6 и 7 приведены схемы включения модулей блоков каркаса СТЗ РВ в бортовую информационно-управляющую систему на основе концепции ROS [23–25].

В реализации ПО СТЗ с целью интеграции с ROS возможно применение двух подходов. Первый заключается в декомпозиции ПО СТЗ как совокупности программных компонентов, каждый из которых оформляется в виде узла ROS. Возможная реализация такого подхода показана на рис. 6. Ограничением данного подхода является необходимость применения ROS для функционирования ПО СТЗ. В качестве второго подхода возможно использование дополнительного слоя программных абстракций, обеспечивающих взаимодействие между ПО СТЗ и ROS. В данном случае узлы, показанные на схеме на рис. 6, заменяются несколькими (или одним) узлами, выполняющими ретрансляцию данных, поступающих от ПО СТЗ. Такие промежуточные (прокси) узлы получают данные от ПО СТЗ по протоколу TCP/IP и передают их в формате сообщений ROS (рис. 7). Ограничением данного подхода является внесение коммуникационных задержек на передачу данных между ПО СТЗ и прокси-узлами. При исполнении на одном компьютере величина задержки, как правило, не превышает 1 мс (при отключении буферизации сетевого протокола). Такая задержка может считаться приемлемой, если сообщения ПО СТЗ не используются в качестве высокочастотных сигналов управления исполнительными устройствами.

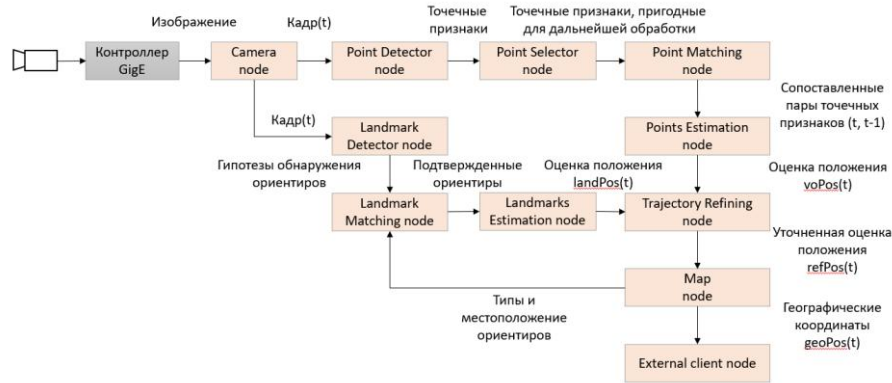


Рис. 6. Схема построения ПО СТЗ в виде совокупности узлов ROS (на примере задачи определения собственного движения ТС на основе монокулярной визуальной одометрии [26–30] и обнаружения ориентиров)

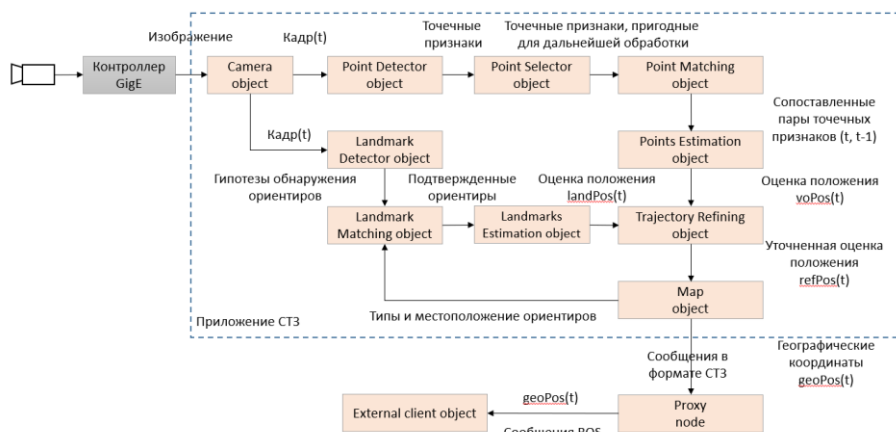


Рис. 7. Схема взаимодействия ПО СТЗ с программными клиентами на базе ROS (на примере задачи определения собственного движения ТС на основе монокулярной визуальной одометрии и обнаружения ориентиров)

Примеры реализации описанной методики и информационного модуля. Повышение степени автономности РТК ВН реализуется поэтапно, исходя из существующего состояния РТК ВН. В настоящее время констатируем активное использование дистанционно управляемых РТК. При такой организации управления вся нагрузка по организации сбора и обработки поступающих данных, ложится на оператора РТК и требует непрерывного использования широкополосного быстродействующего канала связи оператор – борт РТК. Повышение степени автономности РТК, в свою очередь, требует повышения интеллектуальной автономности, подразумевающей передачу части функций оператора по получению информации, необходимой для обеспечения функционирования РТК, бортовой информационно-управляющей системе (БИУС). Такой режим управления называется супервизорным. Наиболее перспективным средством обеспечения БИУС необходимой информацией представляются системы технического зрения (СТЗ). В этих системах выделяются две основных части: регистрирующие блоки (РБ) – различные виды видеокамер, реализующие сбор зрительных данных и вычислительно-управляющие блоки (ВУБ), управляющие сбором и обработкой зрительных данных. При этом чем большее количество задач ставится перед РТК и чем более сложные эти задачи, тем большее количество данных требуется собрать и обработать в масштабе реального времени.

В режиме телеуправления на борту РТК устанавливаются РБ, а функции ВУБ возлагаются на оператора, получающего данные от РБ по каналам связи. В супервизорном режиме часть функций обработки зрительных данных передаётся на борт, здесь необходимо установить ВУБ, обладающий вычислительной мощностью и программным обеспечением, способный собрать и обработать необходимый объём зрительных данных. ВУБ необходимой мощности вместе с ПО на основе каркаса ПО СТЗ РБ образует информационный модуль. В соответствии с объёмом действий по сбору и обработке зрительных данных, который может быть обработан в масштабе реального времени, информационные модули разделяются на модули малой и большой мощности. По относительному объёму задач, решение которых информационный модуль может выполнить на борту, возможно указать степень автономности, обеспечиваемой этим модулем. (Например, низкая: от 5 до 20% всех задач, решаемых в процессе выполнения миссии; средняя: от 20 до 50%; высокая: от 50 до 100%). Отдельным и в ряде случаев принципиально важным обстоятельством, как для принятия решений о снабжении РТК степенью автономности, так и для определения ниши использования РТК (РТК с ограниченным сроком эксплуатации; РТК с длительным сроком), является отношение стоимости предлагаемых решений по повышению степени автономности к стоимости исходной платформы РТК, подвергаемой модернизации. Из имеющегося опыта наиболее приемлемым соотношением является стоимость информационного модуля в пределах 15–50% от стоимости существующего телеуправляемого НРТК. Увеличение стоимости от 50 до 100% также находит применение, но является менее употребительным. Возрастание стоимости более чем на 100%, как правило переводит НРТК в класс редких, особо оберегаемых технических устройств.

Приведём примеры задач, решаемых представителями каждого из классов информационных модулей. На первых этапах повышения степени автономности выделены задачи, выполнение которых на борту позволяет снять или облегчить оператору решение таких задач, как определение положения и траектории РТК в процессе движения, обнаружение препятствий указанного вида, определение объектов интереса в полях зрения бортовых видеокамер.

В конфигурационном пространстве фиксируем постановку задачи (ось моделей), на оси аппаратуры фиксируем имеющуюся на борту подвижной платформы систему управления (СУ). Если СУ реализована в концепции ROS, то процесс встраивания информационного модуля происходит быстрее – примерно 1 человеко-месяц, если нет, то дополнительные трудозатраты на оформление программных интерфейсов (примерно ещё 1 человеко-месяц). По оси алгоритмов определяем какое алгоритмическое обеспечение может выполнить поставленную задачу (рассмотрение плоскости модели – алгоритмы). А в плоскости алгоритмы – аппаратура определяем требуемые вычислительные ресурсы. Общее рассмотрение позволяет определить стоимость полученного решения. Например, для наземного РТК с ограниченным сроком эксплуатации – достаточно выполнить в режиме телеуправления выдвижение в заданное местоположение, после чего перейти в режим супервизорного управления для решения задачи наблюдения за заданной областью

пространства с целью обнаружения кандидатов на объекты интереса их идентификации с участием оператора и сопровождения или «обслуживания», также по указанию оператора. В такой постановке стоимость дооснащения существующей платформы, укомплектованной поворотным устройством для крепления полезной нагрузки, дополнительным информационным модулем составляет от 10 до 15% исходной стоимости. Та же конфигурация может быть снабжена большей степенью автономности с увеличением решаемых на борту задач без изменения всей системы, а наращиванием аппаратной части по количеству регистрирующих блоков и вычислительным ресурсам. Стоимость дооснащения возрастает до 20-25% исходной стоимости. На данный момент получены и опробованы на практике решения следующих задач.

С помощью информационного модуля, использующего в своей аппаратной составляющей две видеокамеры с разрешением 1600x1200 пикселей, объективами с трансфокаторами и ВУБ минимальной комплектации (см. табл. 1) были решены такие задачи информационного обеспечения целенаправленных перемещений в помощь водителю, как: удержание в полосе движения, предупреждение о препятствиях известного типа, сохранение направления на указанный ориентир. Для информационного обеспечения полезной нагрузки тот же информационный модуль выполняет задачи наблюдения заданной области с целью обнаружения объектов интереса заданного класса; автоматическое сопровождение указанного объекта интереса. Стоимость такой модернизации существующего НРТК составила 15 % стоимости исходного варианта.

С помощью более мощного информационного модуля, использующего в своей аппаратной составляющей три видеокамеры: стерео систему с разрешением 2464x2056 пикселей, видеокамеру с разрешением 4000x3000 пикселей, объективом с трансфокатором и ВУБ расширенной комплектации (см. табл. 1) в дополнение к указанным выше были решены такие задачи информационного обеспечения целенаправленных перемещений в помощь водителю, как: определение положения и траектории РТК относительно исходного положения; определение неровностей на впередилежащей поверхности движения; предупреждение о препятствиях типа значительные отклонения от горизонтальной поверхности». Для информационного обеспечения полезной нагрузки – обнаружение подвижных объектов интереса и информационное обеспечение взаимодействия с ними.

Заключение. Предложенные в статье методика и программно-аппаратные решения могут быть успешно применены для решения различных народнохозяйственных задач. Например, отдельные решения уже опробовались для повышения степени автономности сельскохозяйственной техники. Система информационного обеспечения целенаправленных перемещений, была реализована на экспериментальном образце интеллектуального трактора. Здесь же была показана возможность обеспечения контроля функционирования разнообразного навесного оборудования.

Другой областью применения предложенного модуля информационного обеспечения подвижных средств может стать беспилотная авиация. В этой сфере применения дополнительным ограничивающим фактором выступают массо-габаритные и энергетические ограничения, но для БЛА с взлётной массой 5 кг и больше уже имеются примеры успешного применения подобного информационного модуля для решения задач возврата без использования спутниковой навигационной системы и информационного обеспечения автономной посадки – соблюдения глиссады по видеоданным. Диапазон возможных аппаратных решений, совместно с унифицированной программно-аппаратной архитектурой открывают большие возможности для выбора экономически целесообразной компоновки средств наращивания степени автономности разнообразной подвижной техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Christensen H.I., Sloman A., Kruijff G.-J., Wyatt J. Cognitive Systems. Reports on the European Union project on Cognitive Systems. – Свободный режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/50369027_Cognitive_Systems (дата обращения: 01.02.2025).
2. Богуславский А.А., Боровин Г.К., Карташев В.А., Павловский В.Е., Соколов С.М. Модели и алгоритмы для интеллектуальных систем управления. – ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2019.
3. Huang H. et al. Autonomy Measures for Robots // Proc. of the 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Anaheim, California, November 2004.

4. Huang H., Messina E., Albus J. Autonomy Level Specification for Intelligent Autonomous Vehicles: Interim Progress Report // PerMIS Workshop, Gaithersburg, MD. – 2003.
5. Huang H. et al. Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework: An Update // SPIE Defense and Security Symposium, Orlando, Florida, March 2005. – 2005.
6. Barbera A. et al. Software Engineering for Intelligent Control Systems // KI Journal Special Issue on AI and Software Engineering, Germany. – 2004. – No. 3.
7. Huang H. et al. Autonomy Levels for Unmanned Systems Framework // NIST Special Publication 1011, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. – 2004. – Vol. I: Terminology.
8. Huang H., Pavek K., Novak B., Albus J., Messina E. A Framework for Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) // Proceedings of the AUVSI's Unmanned Systems North America June 2005, Baltimore, MD. – 2005.
9. Бозулавский А.А., Соколов С.М. Технология изготовления программного обеспечения СТЗ автономных РТК // Тр. 34-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», 23-24 ноября 2023. – СПб.: ЦНИИ РТК, 2023. – С. 27-35.
10. Соколов С.М. Сравнительный анализ степени автономности робототехнических комплексов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 1 (231). – С. 65-76.
11. Соколов С.М. Технологии технического зрения и военно-технические задачи боевой робототехники // Вооружение и экономика. – 2023. – № 3 (65). – С. 51-59.
12. Intel Corp. Accelerate Automotive with Intel. – Свободный режим доступа: <https://www.intel.com/content/www/us/en/automotive/overview.html> (дата обращения: 01.02.2025).
13. Лю Ш. и др. Разработка беспилотных транспортных средств. – М.: ДМК Пресс, 2022. – 246 с.
14. Panayiotou K. et al. A Framework for Rapid Robotic Application Development for Citizen Developers // Software Magazine. – 2022. – P. 53-79.
15. Shnkland S. Tesla self-driving car computer. – Свободный режим доступа: <https://www.cnet.com/news/meet-tesla-self-driving-car-computer-and-its-two-ai-brains/> (дата обращения: 01.02.2025).
16. Apollo Open Platform. – Свободный режим доступа: <https://developer.apollo.auto/> (дата обращения: 01.02.2025).
17. NVIDIA DRIVE Hyperion Autonomous Vehicle Development Platfor. – Свободный режим доступа: <https://developer.nvidia.com/drive/hyperion-7.1> (дата обращения: 01.02.2025).
18. Serrano D. Middleware and Software Frameworks in Robotics. Applicability to Small Unmanned Vehicles. – STO-EN-SCI-271, STO/NATO, 2015. – 8 p.
19. Tsardoulis E., Mitkas P. Robotic frameworks, architectures and middleware comparison // arXiv:1711.06842v1. – 2017.
20. Wigness M., Eum S., Rogers J., Han D., Kwon H. A RUGD Dataset for Autonomous Navigation and Visual Perception in Unstructured Outdoor Environments // Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS) 03-08 November 2019. – 2019.
21. Albl C. et al. Multi-view drone tracking datasets. – Свободный режим доступа: <https://github.com/CenekAlbl/drone-tracking-datasets/tree/master> (дата обращения: 01.02.2025).
22. Бочаров Н.А. и др. Математические и программные модели задач технического зрения робототехнических комплексов на основе микропроцессоров «Эльбрус» // Тр. ИСП РАН. – 2022. – Т. 34. – Вып. 6. – С. 82-99.
23. Newman W. A Systematic Approach to Learning Robot Programming with ROS. – CRC Press, 2018.
24. Fregin A. et al. Building a Computer Vision Research Vehicle with ROS. – Свободный режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/348769946_Building_a_Computer_Vision_Research_Vehicle_with_ROS (дата обращения: 01.02.2025).
25. Hu T. et al. ROS-based ground stereo vision detection: implementation and experiments // Robotics and Biomimetics. – 2016. – No. 3.
26. Nister D., Naroditsky O., Bergen J. Visual odometry // Proc. Int. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition. – 2004. – P. 652-659.
27. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual Odometry // IEEE Robotics and Automation Magazine. – 2011. – No. 12. – P. 80-92.
28. Konolige K., Agrawal M., Sol J. Large scale visual odometry for rough terrain // Proc. Int. Symp. Robotics Research. – 2007.
29. Tardif J., Pavlidis Y., Daniilidis K. Monocular visual odometry in urban environments using an omnidirectional camera // Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems. – 2008. – P. 2531-2538.
30. Agostinho L. et al. A Practical Survey on Visual Odometry for Autonomous Driving in Challenging Scenarios and Conditions // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10.

REFERENCES

1. Christensen H.I., Sloman A., Kruijff G.-J., Wyatt J. Cognitive Systems. Reports on the European Union project on Cognitive Systems. Available at: https://www.researchgate.net/publication/50369027_Cognitive_Systems (accessed 01 February 2025).

2. Boguslavskiy A.A., Borovin G.K., Kartashev V.A., Pavlovskiy V.E., Sokolov S.M. Modeli i algoritmy dlya intellektual'nykh sistem upravleniya [Models and algorithms for intelligent control systems]. IPM im. M.V. Keldysha RAN, 2019.
3. Huang H. et al. Autonomy Measures for Robots, *Proc. of the 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Anaheim, California, November 2004*.
4. Huang H., Messina E., Albus J. Autonomy Level Specification for Intelligent Autonomous Vehicles: Interim Progress Report, *PerMIS Workshop, Gaithersburg, MD, 2003*.
5. Huang H. et al. Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework: An Update, *SPIE Defense and Security Symposium, Orlando, Florida, March 2005, 2005*.
6. Barbera A. et al. Software Engineering for Intelligent Control Systems, *KI Journal Special Issue on AI and Software Engineering, Germany, 2004, No. 3*.
7. Huang H. et al. Autonomy Levels for Unmanned Systems Framework, *NIST Special Publication 1011, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2004, Vol. I: Terminology*.
8. Huang H., Pavek K., Novak B., Albus J., Messina E. A Framework for Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS), *Proceedings of the AUVSI's Unmanned Systems North America June 2005, Baltimore, MD, 2005*.
9. Boguslavskiy A.A., Sokolov S.M. Tekhnologiya izgotovleniya programmno obespecheniya STZ avtonomnykh RTK [Technology of software development for vision systems of autonomous robotic systems], *Tr. 34-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Ekstremal'naya robototekhnika», 23-24 noyabrya 2023* [Proc. of the 34th International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics", November 23-24, 2023. Saint Petersburg: TSNII RTK, 2023, pp. 27-35].
10. Sokolov S.M. Sravnitel'nyy analiz stepeni avtonomnosti robototekhnicheskikh kompleksov [Comparative analysis of the degree of autonomy of robotic systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 1 (231), pp. 65-76.
11. Sokolov S.M. Tekhnologii tekhnicheskogo zreniya i voenno-tekhnicheskie zadachi boevoy robototekhniki [Technologies of technical vision and military-technical tasks of combat robotics], *Vooruzhenie i ekonomika* [Armament and Economics], 2023, No. 3 (65), pp. 51-59.
12. Intel Corp. Accelerate Automotive with Intel. Available at: <https://www.intel.com/content/www/us/en/automotive/overview.html> (accessed 01 February 2025).
13. Lyu Sh. i dr. Razrabotka bespilotnykh transportnykh sredstv [Creating autonomous vehicle systems]. Moscow: DMK Press, 2022, 246 p.
14. Panayiotou K. et al. A Framework for Rapid Robotic Application Development for Citizen Developers, *Software Magazine*, 2022, pp. 53-79.
15. Shnkland S. Tesla self-driving car computer. Available at: <https://www.cnet.com/news/meet-tesla-self-driving-car-computer-and-its-two-ai-brains> (accessed 01 February 2025).
16. Apollo Open Platform. Available at: <https://developer.apollo.auto/> (accessed 01 February 2025).
17. NVIDIA DRIVE Hyperion Autonomous Vehicle Development Platfor. Available at: <https://developer.nvidia.com/drive/hyperion-7.1> (accessed 01 February 2025).
18. Serrano D. Middleware and Software Frameworks in Robotics. Applicability to Small Unmanned Vehicles. STO-EN-SCI-271, STO/NATO, 2015, 8 p.
19. Tsardoulis E., Mitkas P. Robotic frameworks, architectures and middleware comparison, *arXiv:1711.06842v1*, 2017.
20. Wigness M., Eum S., Rogers J., Han D., Kwon H. A RUGD Dataset for Autonomous Navigation and Visual Perception in Unstructured Outdoor Environments, *Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS) 03-08 November 2019, 2019*.
21. Albl C. et al. Multi-view drone tracking datasets. Available at: <https://github.com/CenekAlbl/drone-tracking-datasets/tree/master> (accessed 01 February 2025).
22. Bocharov N.A. i dr. Matematicheskie i programnye modeli zadach tekhnicheskogo zreniya robototekhnicheskikh kompleksov na osnove mikroprotessorov «El'brus» [Mathematical and software models of technical vision tasks of robotic complexes based on "Elbrus" microprocessors], *Tr. ISP RAN* [Proc. ISP RAS], 2022, Vol. 34, Issue 6, pp. 82-99.
23. Newman W. A Systematic Approach to Learning Robot Programming with ROS. CRC Press, 2018.
24. Fregin A. et al. Building a Computer Vision Research Vehicle with ROS. Available at: https://www.researchgate.net/publication/348769946_Building_a_Computer_Vision_Research_Vehicle_with_ROS (accessed 01 February 2025).
25. Hu T. et al. ROS-based ground stereo vision detection: implementation and experiments, *Robotics and Biomimetics*, 2016, No. 3.
26. Nister D., Naroditsky O., Bergen J. Visual odometry, *Proc. Int. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2004, pp. 652-659.

27. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual Odometry, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2011, No. 12, pp. 80-92.
28. Konolige K., Agrawal M., Sol J. Large scale visual odometry for rough terrain, *Proc. Int. Symp. Robotics Research*, 2007.
29. Tardif J., Pavlidis Y., Daniilidis K. Monocular visual odometry in urban environments using an omnidirectional camera, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, 2008, pp. 2531-2538.
30. Agostinho L. et al. A Practical Survey on Visual Odometry for Autonomous Driving in Challenging Scenarios and Conditions, *IEEE Access*, 2022, Vol. 10.

Соколов Сергей Михайлович – Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук; e-mail: sokolsm@list.ru; г. Москва, Россия; тел.: 84992207994; д.ф.-м.н.; профессор; г.н.с., зав. сектором.

Богуславский Андрей Александрович – Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук; e-mail: anbg74@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: 84992207994; д.ф.-м.н.; в.н.с.

Sokolov Sergey Mikhailovich – Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences; e-mail: sokolsm@list.ru; Moscow, Russia; phone: +74992207994; dr. of math. and physics. sc.; professor; principal researcher, chief division.

Boguslavsky Andrey Alexandrovich – Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences; e-mail: anbg74@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +74992207994; dr. of math. and physics. sc.; leading researcher.

УДК 004.896; 303.732.4

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-140-150

Н.М. Чернышов, И.К. Романова-Большакова

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТА ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ С РОБОТИЗИРОВАННЫМИ СИСТЕМАМИ

Целью исследования является разработка методики идентификации и определения местоположения объектов в условиях низкой видимости и возможного изменения их формы, с акцентом на извлечение деталей, созданных методом селективного лазерного спекания (SLS), из порошковой среды. В работе рассматриваются два принципиально разных подхода к формированию алгоритмов управления роботизированным манипулятором. Первый подход, доверительный, основан на предположении о минимальном смещении объекта в процессе манипуляций. Манипулятор движется по траектории, рассчитанной на основе предварительной трехмерной модели, без коррекции до момента захвата. Этот метод отличается высокой скоростью выполнения операции и минимальными вычислительными затратами. Однако он сопряжен с рисками: деформация объекта из-за сопротивления среды, смещение детали при контакте с инструментом, а также невозможность захвата при значительных отклонениях от номинального положения. Второй подход, осторожный, предполагает поэтапное удаление слоев порошка для визуализации объекта и корректировки траектории до захвата. Этот метод включает несколько этапов: удаление верхнего слоя среды до частичного обнажения детали, анализ данных для уточнения положения объекта, а также построение адаптивной траектории с учетом возможного смещения. Отдельное внимание в статье уделено генерации данных для обучения нейронных сетей, которые используются для идентификации объектов в условиях зашумленности. Рассмотрены два метода искусственного моделирования порошковых покрытий. Примитивный метод заключается в расширении вершин трехмерной модели вдоль нормалей с добавлением случайного шума. Усовершенствованный метод предполагает дифференцированное распределение порошка с учетом локальной кривизны поверхности. Последующие экспериментальные результаты показали, что обучение нейронной сети с использованием реальных данных имеет низкую эффективность. Точность распознавания составила 60–75%, что связано с малым объемом выборки и влиянием внешних факторов, таких как освещение и помехи. В то же время использование синтетических данных, подготовленных по представленной в исследовании методике, позволило повысить точность распознавания до 92%. Практическая значимость работы заключается в разработке методики поиска, обнаружения и определения детали, погруженной в порошок, что может быть использовано для автоматизации процессов постобработки на производствах, использующих селективное лазерное спекание. Разработанные решения адаптированы для интеграции в роботизированные системы,

работающие в условиях ограниченной видимости. Предложенные методы могут быть масштабированы на широкий спектр задач в аддитивном производстве и робототехнике, что делает их перспективными для внедрения в промышленные процессы.

Селективное лазерное спекание; обнаружение объектов; нейронная сеть; генерация данных; моделирование изменения объекта.

N.M. Chernyshov, I. K. Romanova-Bolshakova

OBJECT IDENTIFICATION METHOD FOR INTEGRATION WITH ROBOTIC SYSTEMS

The aim of the research is to develop a methodology for identifying and determining the location of objects under conditions of low visibility and potential changes in their shape, with a focus on extracting parts created using selective laser sintering (SLS) from a powder medium. The study examines two fundamentally different approaches to forming control algorithms for a robotic manipulator. The first approach, trust-based, is based on the assumption of minimal displacement of the object during manipulation. The manipulator moves along a trajectory calculated from a preliminary three-dimensional model without correction until the moment of capture. This method is characterized by high operational speed and minimal computational costs. However, it carries risks such as object deformation due to environmental resistance, displacement of the part upon contact with the tool, and the inability to capture the object if it deviates significantly from its nominal position. The second approach, cautious, involves the gradual removal of powder layers to visualize the object and adjust the trajectory before capture. This method includes several stages: removing the top layer of the medium to partially expose the part, analyzing data to refine the object's position, and constructing an adaptive trajectory considering possible displacement. Special attention in the article is given to data generation for training neural networks, which are used for object identification under noisy conditions. Two methods of artificial modeling of powder coatings are considered. The primitive method involves expanding the vertices of a three-dimensional model along their normals with the addition of random noise. The improved method proposes differentiated powder distribution considering local surface curvature. Subsequent experimental results showed that training a neural network using real data has low efficiency. Recognition accuracy ranged from 60% to 75%, which is attributed to the small sample size and the influence of external factors such as lighting and interference. At the same time, the use of synthetic data, prepared according to the methodology presented in the study, increased recognition accuracy to 92%. The practical significance of the work lies in the development of a methodology for searching, detecting, and identifying a part immersed in powder, which can be used to automate post-processing processes in industries utilizing selective laser sintering. The developed solutions are adapted for integration into robotic systems operating under conditions of limited visibility. The proposed methods can be scaled to a wide range of tasks in additive manufacturing and robotics, making them promising for implementation in industrial processes.

Selective laser sintering; object detection; neural network; data generation; object change modeling.

Введение. Детали, произведенные методом селективного лазерного спекания, как правило, нуждаются в комплексной постобработке, что значительно увеличивает стоимость производства. Из-за специфики производства после спекания деталь оказывается полностью погруженной в плотную массу порошкообразного материала. Помимо этого, все отверстия и полости детали заполнены порошком. Извлечение детали из формы для запекания и последующая ее очистка являются трудоемкими процессами, выполняемыми вручную сотрудниками производства, вынужденными использовать специальные средства защиты из-за негативного влияния на слизистые оболочки и кожный покров человека, оказываемого материалами, используемыми при производстве.

Одним из ключевых моментов, препятствующих автоматизации процессов постобработки при производстве методом селективного лазерного спекания, является обнаружение произведенной детали в массе порошка и определение ее местоположения для проведения дальнейших манипуляций. Заметным препятствием в этом процессе является недоступность детали для анализа при помощи инструментов видеоанализа после производства процедуры спекания детали. Как следствие, невозможность обнаружения детали на начальном этапе приводит к невозможности построения строго заданной траектории манипулятора, необходимой для извлечения произведенной детали из формы для спекания.

Методология достижения видимости детали. Оценка окружающей среды является очень важной частью планирования извлечения объектов из сред любой плотности. В описываемом случае пространство, в условиях цеха, представлено спекающей установ-

кой и находящейся в ней формой для спекания, манипулятором и условной платформой, на которую необходимо поместить деталь для дальнейшей обработки. Важным условием является размещение извлекаемого объекта. Он погружен в толщу порошка с некоторым количеством порошкообразного материала (из которого и произведена деталь), покрывающего деталь сверху. Таким образом, объект оказывается недоступен для дистанционного анализа какими-либо датчиками, в том числе видеокамерой. Однако, если рассматривать деталь, произведенную посредством SLS, ее местоположение заранее известно, благодаря специфике производства. Впрочем, оно неизбежно будет изменено при проведении манипуляций с порошком из-за отсутствия крепления детали к чему-либо. Расположение детали в форме для спекания схематично представлено на рис. 1

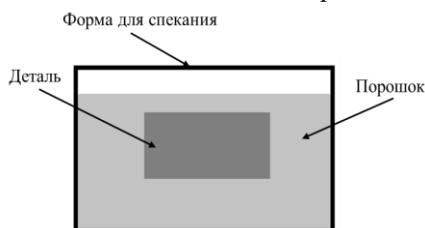


Рис. 1. Расположение детали в толще порошка в форме для спекания.

Представленные условия приводят к необходимости рассмотрения стратегии достижения момента видимости детали в области видимости сенсоров для построения траектории захвата детали. В этом плане для достижения детали в нужных для захвата точках в общих чертах можно выявить два подхода: доверительный – прямое следование траектории, основанной на информации модели, с последующей коррекцией, осторожный – проведение манипуляций в пространстве до построения траектории извлечения.

В первом случае манипулятор движется строго по траектории, рассчитанной, исходя из заранее известной модели пространства, предполагая, что изготовленная деталь имеет точно определенное местоположение в пространстве и не меняет его до момента идентификации обратного. При этом при изначальном расчете могут быть обозначены не точки захвата объекта, а области, в рамках которых допускается вариативность в захвате. Поскольку деталь расположена внутри среды, на траектории манипулятора неизбежно происходит погружение в нее инструмента для захвата. После соприкосновения схвата манипулятора со средой, в которую погружена деталь, происходит смещение ее частиц, способное изменить местоположение детали. Доверительный подход строится на предположении о том, что смещение положения детали в пространстве либо отсутствует, либо пренебрежимо мало. Тогда траектория манипулятора может оставаться неизменной без значимого влияния на результат извлечения. Коррекция траектории допускается уже после предполагаемого успешного захвата детали, когда она появляется на поверхности и становится доступной для анализа. При этом допускается коррекция точек захвата, в том числе при помощи повторного захвата детали.

Доверительный подход имеет все основания стать верным решением, если масса детали, погруженной в среду является значительной в сравнении с перемещающейся массой окружающей среды, либо при допущении, что частицы, составляющие среду, имеют в ходе манипуляций малое перемещение и, как следствие, малое влияние на положение самой детали. В обратном случае смещение детали от номинального местоположения может привести к увеличению попыток успешных захватов или к случайному расположению детали в пространстве таким образом, что ее захват окажется невозможным, а отмеченные для захвата области недостижимыми [1]. Заметные ограничения в использовании метода привносят геометрические параметры извлекаемого объекта. Взаимодействие объекта захвата с окружающей его средой, а также дополнительное усилие, приложенное со стороны схвата, для преодоления сопротивления плотной среды, может привести к появлению дефектов объекта во время его извлечения. Именно это ограничение является критически важным для проведения работ по извлечению деталей, произведенных методом SLS.

Во втором случае, в случае осторожного подхода, предполагается удаление верхнего слоя среды, покрывающей деталь, до тех пор, пока не станет возможным анализ ее местоположения. Таким образом, траектория движения манипулятора носит строго плановый характер до момента появления части детали на поверхности до произведения попыток ее захвата. При этом важно понимать, что появление той или иной части детали на поверхности не гарантирует однозначной идентификации ее местоположения, что увеличивает время, затраченное на подготовку к извлечению.

Такой подход имеет ряд ограничений, связанных с параметрами среды, в которой находится объект. Так, осторожный подход лишен смысла в случае, если объект захвата находится в жидкой среде, не имеющей внешних ограничений. В случае, если жидкость наполняет некоторую емкость, есть возможность удаления части жидкости путем ее выкачивания насосом. Но при нахождении объекта в воде в природных условиях применение такого подхода не приведет к положительному результату.

Тем не менее, применительно к средам, схожим по параметрам к рассматриваемым в практической задаче, осторожный подход, наиболее вероятно, способен продемонстрировать результаты заметно лучше, чем доверительный. Благодаря предварительной диагностике местоположения детали и уменьшению сопротивления среды вероятность повреждения объекта захвата снизится [2]. Точность захвата при этом увеличивается, так как открывается больше возможностей для анализа местоположения объекта и коррекции траектории движения манипулятора. По этой причине в случае, если среда, в которую погружен объект, представляет собой порошок, осторожный подход должен рассматриваться в качестве основного.

Применительно к задаче извлечения детали из формы для спекания алгоритм реализации описываемого подхода выглядит следующим образом:

1. Манипулятор движется по намеченной заранее траектории к границе раздела сред.
2. Схватом манипулятора производится сдвигание слоя порошка, расположенного над деталью (местоположение детали сразу после спекания является известным). Этот шаг производится несколько раз, до появления первых частей извлекаемой детали на поверхность.
3. При появлении части детали на поверхность производится анализ ее местоположения. В случае однозначной идентификации местоположения объекта производится его извлечение. В противном случае производятся действия, описанные ниже.
4. Схватом манипулятора производится сдвигание массы порошка, расположенной рядом с деталью. Смещение порошка происходит с той стороны, которая способна предоставить наибольшее количество информации о местоположении детали. Координаты такой области рассчитываются до начала извлечения. Этот шаг выполняется рекурсивно до получения однозначного местоположения извлекаемой детали.
5. На основании полученной информации о детали (в ходе манипуляций ее местоположение неизбежно изменится в сравнении с первоначальным) строится скорректированная траектория манипулятора для захвата детали в определенных точках.
6. Корректируется обратная траектория манипулятора с деталью в схвате.
7. Производится захват объекта. При этом траектория манипулятора претерпевает незначительные изменения в случае, если в ходе достижения точек захвата произошло изменение местоположения детали. Коррекция траектории в этом случае производится в процессе достижения точек захвата.
8. Извлечение объекта. Манипулятор следует скорректированной траектории извлечения детали. При этом траектория может быть скорректирована в ходе извлечения в случае, если сопротивление, встречаемое со стороны среды во время извлечения, превышает допустимое расчетное.

Следование такому алгоритму извлечения детали из формы для спекания приведет к минимизации вероятности появления дефектов самой детали. Сравнение доверительного и осторожного подходов к формированию алгоритма извлечения детали показывает, что использование осторожной стратегии является более оправданной применительно к поставленной практической задаче и может быть приложено к большему числу примене-

ний. Доверительная же тактика является более опрометчивой и может быть применена при извлечении объектов из различных сред только в очень специфичных условиях, хотя и требует меньше затрат на проработку вариативности извлекаемых объектов. Условие того, что характеристики извлекаемого объекта могут говорить о возможном появлении дефектов объекта при взаимодействии со средой, ставит необходимость использования осторожного подхода в задаче извлечения широкой вариации хрупких объектов из сред с высокой плотностью.

Определение местоположения объекта. Одним из ключевых моментов в процессе извлечения детали из формы для спекания остается определение ее местоположения и, как следствие, точек на детали, в которых должен произойти предполагаемый захват [3]. Определение местоположения объекта может быть реализовано при помощи видеокамеры, установленной в рабочем пространстве манипулятора, и нейронной сети, позволяющей идентифицировать объект и определить ориентацию объекта в пространстве. Таким образом, задача определения местоположения и ориентации объекта может быть разбита на несколько пунктов:

1. Выявление объекта в форме для запекания.
2. Выделение образа объекта для получения видимого сечения произведенной детали.
3. Определение ориентации детали, исходя из полученных данных.

Проблема выявления объекта в форме может быть решена при помощи специально обученной нейронной сети. При этом, важно полагать, что за один цикл производства может быть произведено сразу несколько деталей, если того позволяют габаритные размеры деталей и спекающей установки. А, поскольку селективное лазерное спекание зачастую используется для прототипирования, важно отметить, что для каждого такого случая необходимо будет тренировать нейронную сеть заново. Тогда важным параметром нейронной сети, помимо качества определения объекта, будет являться скорость обучения.

Подготовка реальных данных. Поскольку множество деталей, которые можно произвести методом селективного лазерного спекания, достаточно велико, тренировка универсальной нейронной сети является бесполезным занятием – детали могут быть до смещения похожи, но при этом обладать совершенно различными прочностными характеристиками [4]. По этой причине подготовленную нейронную сеть необходимо обучать либо для каждой детали отдельно (в случае со спеканием единственной за один производственный цикл), либо для численно ограниченного набора деталей (одинаковых или различных) [5]. При этом габаритные ограничения формы для запекания играют важную роль, ограничивая количество производимых за один цикл деталей.

Подготовка данных для обучения нейронной сети является очень важной деталью, заметно влияющей на эффективность конечной системы распознавания [6]. В случае с производством деталей методом селективного лазерного спекания есть два способа сбора данных и генерации набора данных – использование реальных данных и искусственных.

Использование реальных данных имеет преимущество из-за того, что они получены с макета настоящей произведенной детали, со всеми ее изначальными изъянами, обусловленными наливанием порошка на поверхность и заполнением им всех отверстий и вогнутостей детали [7]. Также, для использования реальных данных можно провести предварительную подготовку изображений, предварительно выделив контур изображений при помощи методов обработки изображений.

Тем не менее, такой подход сталкивается с рядом трудностей. Во-первых, сбор данных с произведенной модели занимает значительное количество времени, так как для качественного обучения требуется достаточно много данных, а цикл производства одной детали может занимать до суток. Во-вторых, селективное лазерное спекание, как и множество других аддитивных технологий, зачастую используется для прототипирования и единичного производства [8]. В таком случае сбор данных увеличит время, затраченное на процесс, в несколько раз и, следовательно, стоимость разработки и прототипирования.

В свою очередь, генерация искусственных данных является более универсальным способом, применимым для различных типов производств и не требующим ручного труда. Однако, этот метод встречает ряд проблем, связанных с трудностью моделирования

налипших на деталь частиц порошка. Поскольку основным процессом в селективном лазерном спекании является наплавление порошка при помощи лазера, существующие работы на тему математического моделирования характеристик детали были направлены на исследование преобразований материала в ходе спекания, минуя процесс излишнего налипания порошка.

Методика генерации искусственных данных. Генерация порошка и искусственных припорошенных моделей – задача текущих исследований, которые проводятся в различных научных организациях по всему свету. Задача осложняется тем, что налипание имеет стохастический характер, а в ходе извлечения порошок неизбежно пересыпается, меняет местоположение. Таким образом, форма детали, с точки зрения записывающего устройства, заметно изменяется. На текущий момент в последних исследованиях встречается несколько подходов к генерации искусственных припорошенных моделей для тренировки нейронной сети, определяющей объект исследования.

На тему порошков в аддитивном производстве проведен широкий ряд исследований. Например, распределение брызг на форме для запекания и даже определение дефектов на лазерно-порошковой наплавке [9]. Тем не менее, распределение порошка на напечатанных деталях остается неисследованным.

Моделирование порошка на поверхностях печатных деталей схоже со скоплением снега на уличных объектах. Например, недавняя работа авторов [10] была проведена с использованием основной модели падения и скапливания снега [11] и управляемой упругопластической конститутивной модели с интегрированным гибридным методом материальных точек Эйлера-Лагранжа для моделирования снега. Частицы снега были описаны физически, в то время, как симуляторы твердых и жидких тел совместно симулировали широкий спектр поведения снега.

Генерация искусственных образов с использованием композиции не всегда требует трехмерной модели объекта. Булс [12] и его коллеги работали над генерацией груды объектов, используя метод композиции, путем захвата разных видов реальных объектов и их соединения в единое целое, однако результаты определения не были благоприятными – точность правильно обнаруженных объектов колебалась от 10% до 29% для различных объектов.

Двибеди, Мисра и Хеберт [13] представили другой подход, использующий композицию для быстрого синтеза данных для обнаружения объектов, отталкивающийся от реальных изображений объектов и их окружения и автоматического извлечения масок объектов. Объекты помещались в сценарии с различными смесями для генерации итоговых данных. Лучший показатель эффективности был достигнут на уровне 50,8% в среднем при обучении на смеси реальных и искусственных изображений и тестировании на невидимом наборе данных.

Одним из достаточно эффективных способов генерации деталей с налипшим на их поверхность порошком является рандомизация доменов – простой метод обучения моделей исключительно на симулированных образах. Тобин и его коллеги сосредоточились на задаче обучения нейронных сетей с использованием рандомизации доменов для проведения локализации объектов для роботизированного захвата в беспорядочной среде [14]. Они обнаружили, что для ряда геометрических объектов они смогли натренировать детектор с точностью до полутора сантиметров в реальной среде, используя только симулированные данные, визуализированные только с помощью простых сгенерированных текстур.

Ражпура, Бажинов и Хедж показали, что при помощи трансферного обучения и рандомизации доменов можно эффективно натренировать детектор объектов практически только на смоделированных данных [15]. Они применили эту стратегию для определения упакованных продуктов, расположенных в холодильнике и получили 24% средней точности (mAP – mean average precision) при использовании 55 интересующих объектов и 17 отвлекающих объектов при тестировании. Нейросеть была обучена на 4000 искусственных образах.

Даниельчук с коллегами предложили метод автоматической генерации искусственных данных 50000 изображений глубины и 340000 масок объектов, используя симулированные кучи трехмерных моделей, для задачи сбора мусорных корзин [16]. Рандомизация

доменов была применена для трехмерных объектов, мест расположения камер и внутренних параметров камеры. Авторы изменили нейросеть Mas R-CNN для обучения на искусственных и реальных изображениях глубины и пришли к выводу, что сеть, обученная на искусственных образах, превзошла сеть, обученную на реальных изображениях глубины, основываясь на средней точности и среднем отклике.

Главным выводом предыдущих работ заключался в том, что рандомизация доменов была лучше с точки зрения производительности натренированной сети по сравнению с методом композиции [17]. К тому же, метод композиции требовал немного реальных данных, которые могут быть недоступны из-за разнообразия трехмерных печатных деталей, в то время, как все методы трехмерной печати требуют использования трехмерной модели объекта. Таким образом, использование рандомизации доменов для генерации искусственных образов для обучения было адаптировано для рассматриваемой практической задачи.

Однако, из-за порошка на печатных деталях их форма визуально отличается от трехмерных моделей, что может оказать влияние на производительность сети. Следовательно, существует потребность в методе, способном предоставить ряд припорошенных моделей с, как минимум, одной моделью, напоминающей припорошенную деталь. Подобные были предложены исследователями Лимом и Фамом [18]. В случае с покрытыми порошком деталями, другой жизнеспособной альтернативой использованию глубоких нейронных сетей определения объектов может стать управление идентификацией с использованием сопоставления облаков точек.

Примитивный метод генерирования порошка является простым подходом, включающим в себя случайное расширение вершин файла STL вдоль их нормалей. Шаги являются следующими:

1. Дискретизация STL-файла объекта до облака точек с помощью дисковой выборки Пуассона. Это было сделано для лучшего распределения точек, на которых создавался искусственный порошок.
2. Расчет средних габаритов путем суммирования длины, высоты и ширины ограничительной рамки объекта.
3. Задание диапазона значений размеров для случайного выбора на основе процентного содержания порошка, заданного пользователем. Это значение находится в диапазоне от 0 до 1.
4. Выбор случайного значения в диапазоне размеров для каждой вершины. Новая вершина будет растянута вдоль нормали вершины на это значение.
5. Перестроение треугольной сетки из облака точек, созданного из новых расширенных точек, используя метод перестроения поверхности Пуассона для получения припорошенной модели.

Примитивный метод генерирования порошка, используемый Тобином и коллегами, произвел ряд моделей. Значения степени покрытия порошком в 5%, 10% и 15% являются достаточно надежными, то есть по крайней мере один образец из этих значений образует экземпляр, напоминающий реальную покрытую порошком деталь.

Примитивный метод генерации порошка обрабатывает вогнутые и выпуклые области одинаково. Тем не менее, эмпирически можно заметить, что порошок имеет тенденцию скапливаться в вогнутых областях в большей степени. Основываясь на этом наблюдении, был предложен усовершенствованный метод генерации порошка, который добавляет порошок дифференцированно, в зависимости от локальной кривизны (выгнутости) поверхности, которая характеризуется выпуклой оболочкой объекта. Шаги являются следующими:

1. Дискретизация STL-файла объекта до облака точек с помощью дисковой выборки Пуассона.
2. Получение выпуклой оболочки объекта. Выпуклая оболочка представляет общую информацию о геометрии объекта, включая вогнутые и выпуклые области.
3. Поиск точки пересечения Q на выпуклой оболочке для каждой точки P облака точек, используя алгоритм пересечения лучей и треугольников Моллера-Трумбора.

4. Расчет длины и направления PQ , если P не совпадает с Q . Большая длина PQ означала, что интересующая точка была слишком далеко от выпуклой оболочки, что может означать, что эта точка может быть вогнутой и, следовательно, там может быть обнаружено больше порошка. Если P и Q совпадают, это означает, что точка лежит на поверхности выпуклой оболочки и может являться выпуклой точкой. Однако, поскольку реальные объекты также могут иметь порошок на выпуклых поверхностях, небольшое случайное значение было получено из единичного распределения и применено вдоль нормали P .

5. Перестроение треугольной сетки, полученной из облака новых расширенных точек, используя метод перестроения поверхности Пуассона, для получения покрытой порошком модели.

Оба метода используют одинаковые первый и последний шаги, заключающиеся в дискретизации STL-файла до облака точек и перестроении облака точек в сеть для получения поверхности, напоминающей реальные покрытые порошком детали. Однако усовершенствованный метод генерации порошка обрабатывает вогнутые и выпуклые области по-разному.

Результат эксперимента по сбору реальных данных. В качестве основной нейронной сети для определения объекта принята сеть Caffe сверточного типа [19]. Архитектурно в ней можно выделить несколько слоев: входной (изображение), слой свертки, слой выборки, полносвязный слой и выходной. Эксперимент ставит целью проверку эффективности определения объекта на изображении описанной нейронной сетью. При этом, данные для ее обучения собраны вручную путем видеосъемки процесса извлечения детали из формы. Для сбора данных была взята деталь, произведенная методом селективного лазерного спекания. Деталь была погружена в порошок в форму для спекания и покрыта слоем порошка поверх, подобно тому, как выглядит форма для спекания с порошком сразу после производства. Затем с помощью металлических пластин часть порошка была смещена в сторону. Шаги по смещению порошка производились до тех пор, пока деталь не появлялась на поверхности в достаточной для ее анализа степени. Те же действия производились с последовательным поворотом детали до получения набора из шести видеозаписей.

После получения видеоматериалов была произведена первичная обработка полученных данных – полученное видео было разделено на отдельные кадры, а затем из набора кадров были исключены не валидные (с плохим качеством, без детали на изображении). Эксперимент проводился трижды с одной и той же деталью, **что позволило обеспечить повторяемость условий и достоверность результатов.** При этом третья съемка была специально проведена для проверки качества обучения нейронной сети. В результате разбиения видеоматериалов на кадры был получен набор реальных данных в виде фотографий деталей, припорошенных в разной степени и находящихся в различной степени погружения в порошок.

К сожалению, данный метод не дал достаточного эффекта. Полученный набор данных оказался, во-первых, достаточно мал (около 2000 изображений для каждого сечения) для качественного обучения нейронной сети, во-вторых, характеризовался низким качеством из-за отсутствия учета внешних факторов, таких как различные помехи или освещенность, что создает проблему при переносе модели в реальные условия эксплуатации. Результаты работы описанной нейронной сети сильно варьировались в зависимости от формы и положения детали. К примеру, для детали, представленной ниже, вероятность определения отдельных сечений в припорошенном состоянии достигала 75% при удачном положении камеры. Пример такой детали представлен на рис. 2,а.

Однако, при рассмотрении деталей с меньшими различиями, но при этом не менее важными для захвата, сечений, показывают заметно меньший результат, в том числе потому, что округлые формы детали оказываются тяжело идентифицируемы в условиях покрытия порошкообразным материалом, коим наполнены детали в силу производства. В случае детали, представленной на рис. 2,б, эффективность определения и вовсе снизилась до 60%. При этом в случае рассмотрения сечения снизу вероятность падает до 15%, так как объект снизу является полым, при этом полость наполнена порошком. Таким образом, набор реальных данных, полученных в ходе видеосъемки деталей, погруженных в различных конфигурациях в порошок, показал низкую эффективность для обучения нейронной сети.

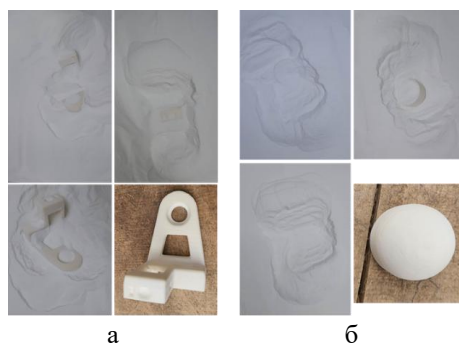


Рис. 2. Фотографии детали свободной от порошка и утопленной в него, используемые для обучения нейронной сети

Генерация искусственных данных. Низкая эффективность описанного ранее сбора реальных данных приводит к необходимости генерации искусственного набора данных для обучения нейронной сети, идентифицирующей объект на изображении. В таком случае важно учитывать, что определяемый объект может иметь геометрические отличия от эталонного в силу наличия налипшего порошка на поверхности.

Для первичной проверки работоспособности нейронной сети был создан набор искусственных изображений, основанных на трехмерной детали, подготавливаемой для производства методом SLS. Поскольку для качественного обучения необходима разная степень зашумленности изображения, подготовка такого набора данных была произведена в несколько этапов:

1. Подготовка видеоряда с трехмерной моделью детали. Выбранная сфера разделяется на 200 меридианов и 200 параллелей, в точках пересечения которых ведется фиксация вида детали. Элемент фиксации вида направлен перпендикулярно поверхности сферы к ее центру.
2. Разделение видеоряда на отдельные кадры, представляющие собой изображения видов детали с различных ракурсов.

Полученные изображения видов детали подвергаются дополнительной обработке в разной комбинации таких параметров, как масштаб (рис. 3,а), поворот (рис. 3,б), яркость (рис. 3,в), наличие шума на изображении (рис. 3,г).

Результатом проведения описанных шагов является набор данных из 100000 различных изображений одного объекта, представленного к автоматизированному извлечению манипулятором. При этом, количество сгенерированных данных может отличаться для каждой отдельной детали путем изменения параметров генерации в случае недостаточности данных для обучения нейронной сети.

При генерации искусственных данных также важным параметром является цвет детали и цвет фона, на котором она изображена [20]. Применительно к рассматриваемой в данной работе практической задаче это обстоятельство приносит дополнительные сложности. Объект, предлагаемый к извлечению, расположен в среде того же цвета, что осложняет выделение контуров объекта и, как следствие, определение его местоположения в пространстве. По этой причине для улучшения качества набора данных и, как следствие, качества обучения нейронной сети на искусственно созданных изображениях деталь и фон, на котором она расположена, имеют одну цветовую гамму и отличаются по цвету незначительно.

Для дальнейшей работы с реальными деталями необходимо провести обучение и проверку нейронной сети с измененными геометрическими характеристиками детали – наличием налипшего на нее порошка. Для этого был применен усовершенствованный метод.

Для составления набора данных для обучения была выбрана та же деталь, что использовалась для генерации набора без порошкообразных новообразований. При этом для составления разнообразного набора варьировалось как количество самих частиц, так и их размер. Поскольку в ходе спекания возможно спекание нескольких частиц между собой, на детали могут образовываться агломерации налипших частиц. Примеры полученных моделей для создания набора данных указаны на рис. 3,д.

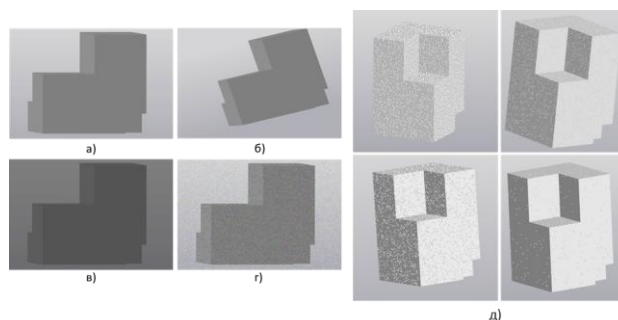


Рис. 3. Примеры сгенерированных деталей, покрытых порошком

К полученным моделям покрытых порошком деталей были применены те же действия, что использовались при сборе данных с пустых моделей деталей. В результате был собран набор из 400000 измененных изображений припорошенной детали. Этого объема данных хватило для обучения нейронной сети обнаруживать деталь даже в сильноизмененном состоянии – с большим скоплением порошка на поверхности. В итоге вероятность обнаружения детали на изображении достигла 92%, чего вполне достаточно для определения детали на видеопотоке. Учитывая тот факт, что в пространстве происходят регулярные изменения как в освещенности детали, степени ее появления на поверхности, так и в составе объектов на изображении (в объектив неизбежно будут попадать те или иные части манипулятора), потеря объекта на 8% кадров принята в пределах допустимого.

Заключение. Разработанная методика поиска объекта и достижения видимости объекта на фиксирующей видеокамере показала свою работоспособность при рассмотрении детали в пространстве, соответствующем производству методом селективного лазерного спекания. При этом представлены возможные варианты использования как осторожного, так и доверительного подходов.

Описанная методика формирования порошкообразного материала на трехмерных моделях деталей в ходе проверки подтвердила свою работоспособность на высоком уровне. Дальнейшие изыскания насчет целесообразности использования метода формирования данных для обучения нейронной сети поиску детали на изображении показали высокую эффективность искусственной генерации данных в сравнении со сбором данных вручную с применением готовой детали.

Таким образом, применение подхода создания искусственного набора данных для обучения нейронной сети позволяет не только за короткое время получить необходимый набор данных, но и избежать влияния человеческого фактора на его качество. Использование таких методов может значительно ускорить процесс разработки и улучшить точность предсказаний, что в свою очередь повысит эффективность производства и снизит затраты на подготовку к производству новых деталей. Возможность генерировать синтетические наборы данных также открывает новые возможности для тестирования алгоритмов в различных сценариях без ограничений реальных данных. Такая гибкость позволяет разработчикам и технологам исследовать более широкий спектр условий и крайних случаев, что в конечном итоге приводит к созданию более надежных и адаптируемых моделей машинного обучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Waltermann R.D. Method and system for locating objects, US7049960B2, 23 май 2006 г.
2. Janabi-Sharifi F. Collision: Modeling, simulation and identification of robotic manipulators interacting with environments, *J. Intell. Robot. Syst.*, May 1995, Vol. 13, Issue 1, pp. 1-44. DOI: 10.1007/BF01664754.
3. Wojcienchowski C.R., Steele D.S., and Scudder H.J. III. Device for method for manipulating a part, 4802195, 31 January 1989.
4. Abbe E. and Sandon C. On the universality of deep learning, *Advances in Neural Information Processing Systems*. Curran Associates, Inc., 2020, pp. 20061-20072.

5. Comprehensive system based on a DNN and LSTM for predicting sinter composition, *Appl. Soft Comput.*, October 2020, Vol. 95, pp. 106574. DOI: 10.1016/J.ASOC.2020.106574.
6. Ahmd W.A. Data preprocessing for neural networks, в *IEEE Students Conference, ISCON '02. Proceedings*, August 2002, 6-6. DOI: 10.1109/ISCON.2002.1214589.
7. Lopez E. et al. Evaluation of 3D-printed parts by means of high-performance computer tomography, *J. Laser Appl.*, June 2018, Vol. 30, Issue 3, pp. 032307. DOI: 10.2351/1.5040644.
8. Usher J.S. and Srinivasan M.K. Quality Improvement of a Selective Laser Sintering Process, *Qual. Eng.*, December 2000, Vol. 13, Issue 2, pp. 161-168. DOI: 10.1080/08982110108918638.
9. He K., Gkioxari G., Dollár P., u Girshick R. Mask R-CNN», 24 January 2018, *arXiv: arXiv:1703.06870*. DOI: 10.48550/arXiv.1703.06870.
10. Stomakhin A., Schroeder C., Chai L., Teran J., and Selle A. A material point method for snow simulation, *ACM Trans Graph.*, July 201, Vol. 32, Issue 4, pp. 102:1-102:10, 3. DOI: 10.1145/2461912.2461948.
11. Moeslund T.B., Madsen C.B., Aagaard M., u Lerche D. Modeling Falling and Accumulating Snow. The Eurographics Association, 2005. DOI: 10.2312/vvg.20051008.
12. Buls E., Kadikis R., Cacurs R., u Ārents J. Generation of synthetic training data for object detection in piles, In: Eleventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2018), March 2019, Vol. 11041, pp. 110411Z. DOI: 10.1117/12.2523203.
13. Dwibedi D., Misra I., and Hebert M. Cut, Paste and Learn: Surprisingly Easy Synthesis for Instance Detection, 4 August 2017, *arXiv: arXiv:1708.01642*. DOI: 10.48550/arXiv.1708.01642.
14. Tobin J., Fong R., Ray A., Schneider J., Zaremba W., and Abbeel P. Domain randomization for transferring deep neural networks from simulation to the real world, *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, September 2017, pp. 23-30. DOI: 10.1109/IROS.2017.8202133.
15. Rajpura P.S., Bojinov H., and Hegde R.S. Object Detection Using Deep CNNs Trained on Synthetic Images, 18 September 2017, *arXiv: arXiv:1706.06782*. DOI: 10.48550/arXiv.1706.06782.
16. Danielczuk M. et al. Segmenting Unknown 3D Objects from Real Depth Images using Mask R-CNN Trained on Synthetic Data, *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2019, pp. 7283-7290. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793744.
17. Dehban A., Borrego J., Figueiredo R., Moreno P., Bernardino A., u Santos-Victor J. The Impact of Domain Randomization on Object Detection: A Case Study on Parametric Shapes and Synthetic Textures, *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, November 2019, pp. 2593-2600. DOI: 10.1109/IROS40897.2019.8968139.
18. Lim J.X.-Y. u Pham Q.-C. Automated post-processing of 3D-printed parts: artificial powdering for deep classification and localisation, *Virtual Phys. Prototyp.*, May 2021, Vol. 16, Issue 3, pp. 333-346. DOI: 10.1080/17452759.2021.1927762.
19. Jia Y. et al. Caffe: Convolutional Architecture for Fast Feature Embedding, 20 June 2014, *arXiv: arXiv:1408.5093*. DOI: 10.48550/arXiv.1408.5093.
20. Taniguchi Y., Morimoto T., Nakada A., and Ohmi T. Data generating method, data generating device, and program, WO2006109709A1, 19 October 2006.

Чернышов Никита Михайлович – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет); e-mail: chernyshov_nikita@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79154280911; аспирант.

Романова-Большакова Ирина Константиновна – Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет); e-mail: irina.romanova@bmstu.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79645960579; д.т.н.; профессор; зам. заведующей кафедрой СМ7 – Робототехнические системы и мехатроника.

Chernyshov Nikita Mikhailovich – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: chernyshov_nikita@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79154280911; graduate student.

Romanova-Bolshakova Irina Konstantinovna – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: irina.romanova@bmstu.ru; Moscow, Russia; phone: +79645960579; dr. of eng. sc.; professor; deputy head of Department ME7 – Robotic Systems and Mechatronics.

Е.Д. Григорьева, В.А. Ушаков**МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ СВОЕВРЕМЕННОЙ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРУППИРОВКИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

Целью исследования является повышение качества оперативного планирования (программного управления) логистических процессов в условиях современных городских систем при взаимодействии группировки робототехнических комплексов. Качество управления в рамках данного исследования будет оцениваться по количеству доставок выполненных позже установленных директивных сроков. Поставленная в ходе исследования цель декомпозируется на следующие задачи: системный анализ современного состояния исследований в области логистики мегаполиса, выполнение содержательной и формальной постановки задачи оперативного планирования логистических процессов в мегаполисе с использованием группировки робототехнических комплексов, разработка модели и алгоритма оперативного планирования логистических процессов в мегаполисе с использованием группировки робототехнических комплексов, разработка специального модельно-алгоритмического обеспечения и его программного прототипа решения задачи оперативного планирования логистических процессов в мегаполисе с использованием группировки робототехнических комплексов. Проактивное (упреждающего) управление группировкой робототехнических комплексов при решении транспортно-логистических задач в мегаполисе в рамках концепции «Умный город» позволяет повысить экономическую эффективность доставки грузов. В рамках статьи рассматривается научно-техническая задача синтеза технологий (планов) своевременной доставки малогабаритных грузов с использованием группировки робототехнических комплексов. Теоретическая значимость заключается в применении концепции комплексного (системного) моделирования и проактивного (упреждающего) управления, а практическая значимость – в обеспечении своевременной доставки грузов с использованием группировки робототехнических комплексов в условиях мегаполиса. В статье рассмотрен пример решения задачи оперативного планирования логистических процессов на примере Инополиса с использованием характеристик роботомобильных комплексов компании Яндекс (в качестве робототехнических комплексов). В ходе исследования проведен анализ различных вариантов целевых функций: максимизация прибыли и минимизация времени доставки; максимизация прибыли и минимизация времени; минимизация количества робототехнических комплексов. Показателями оценки полученных результатов были выбраны: суммарная прибыль от доставок; количество доставок, доставленных не вовремя и общее количество выполненных заказов. Наиболее подходящими целевыми функциями для решения задачи являются минимизация времени или одновременная минимизация времени и максимизация прибыли. Кроме того, в заключении приведены направления дальнейших исследований.

Логистика; группировка РТК; группировка робототехнических комплексов; синтез технологий; статическая модель; оперативное планирование; специальное модельно-алгоритмическое обеспечение; линейное программирование; умный город; мегаполис.

E.D. Grigorieva, V.A. Ushakov**MODEL AND ALGORITHM OF OPERATIONAL PLANNING OF LOGISTIC PROCESSES OF TIMELY DELIVERY OF CARGO WITH THE INTERACTION OF A GROUP OF ROBOTIC COMPLEXES**

The purpose of the study is to improve the quality of operational planning (program control) of logistics processes in the conditions of modern urban systems with the interaction of a group of robotic systems. The quality of management in this study will be assessed by the number of deliveries completed after established directive deadlines. The goal set during the study is decomposed into the following tasks: system analysis of the current state of research in the field of metropolitan logistics, implementation of a substantive and formal formulation of the problem of operational planning of logistics processes in a metropolis using a group of robotic complexes, development of a model and algorithm for operational planning of logistics processes in a metropolis using a grouping of robotic complexes, development of special model-algorithmic support and its software prototype for solving the problem of operational planning of logistics processes in a metropolis using a grouping of robotic complexes. Proactive (anticipatory) management of a group of robotic systems when solving transport and logistics problems in a metropolis with-

in the framework of the "Smart City" concept allows increasing the economic efficiency of cargo delivery. The article examines the scientific and technical problem of synthesizing technologies (plans) for the timely delivery of small-sized cargo using a group of robotic systems. The scientific significance lies in the application of the concept of integrated (system) modeling and proactive (anticipatory) management, and the practical significance lies in ensuring timely delivery of goods using a group of robotic complexes in a metropolis. The article discusses an example of solving the problem of operational planning of logistics processes using the example of Innopolis using the characteristics of Yandex delivery robots (as robotic complexes). During the study, an analysis of various options for objective functions was carried out: maximizing profit and minimizing delivery time; profit maximization; minimizing time; minimizing the number of robotic systems. The following indicators were chosen to evaluate the results obtained: total profit from deliveries; the number of deliveries not delivered on time and the total number of completed orders. The most suitable objective functions for solving the problem are time minimization or simultaneous time minimization and profit maximization. In addition, the conclusion provides directions for further research.

Logistics; RTK group; grouping of robotic systems; synthesis of technologies; static model; operational planning; special model and algorithmic support; linear programming; smart city; metropolis.

Введение. Цифровой транспорт – это, во-первых, объединение сферы транспорта, автомобильной промышленности, а также информационных и сетевых технологий. Во-вторых, это информационная система, которая объединяет в себе множество разных технологий и рассматривает транспорт с позиции интеллектуальных, динамических и интерактивных систем, автономных робототехнических комплексов (РТК), беспилотных транспортных средств и межавтомобильной связи. В-третьих, цифровой транспорт сочетает в себе интерактивность, управление транспортными средствами в автоматическом режиме, связь с внешними устройствами, в том числе датчиками интернета вещей (IoT) [1], искусственным интеллектом. В четвертых, это комплексный технологический продукт с разными функциями, который воплощает в себе новые формы аппаратной части автомобилей.

Согласно проведенному обзору основными направлениями развития цифрового транспорта являются объединение в сеть и интеллектуализация. Для межтранспортной сети используются информационные и сетевые технологии, которые осуществляют интернет-связь внутри транспортных средств, между транспортными средствами и человеком, между транспортными средствами, между транспортными средствами и дорогой, между транспортными средствами и обслуживающей информационной платформой.

«Ядро» цифрового транспорта – данные, которые лежат в основе управления [2, 3] и планирования движения транспортных средств и быстрых, удобных, безопасных транспортных услуг. Внедрение цифровой экономики [4–6] в жизнь населения и систему социального управления, в транспортную сферу позволяют перейти к цифровому транспорту. Оптимальное состояние системы цифрового транспорта – это многомерное объединение людей, транспортных средств, дорог и условий на основе информационных и сетевых технологий. Система состоит из множества подсистем, предназначенных для людей, транспортных средств, дорог, среды, и основные ее функции – сбор, обработка, анализ и использование данных о транспортных средствах, дорогах, услугах.

Система цифрового транспорта оказывает огромное влияние на сферу логистики и позволяет оптимизировать транспортные процессы доставки грузов [7]. Использование цифрового транспорта в сфере логистики вносит вклад в формирование передовой и технологичной городской среды будущего. Автоматизация логистических процессов, за счет использования группировок РТК, способствует улучшению экологической ситуации и рациональному использованию городского пространства.

Анализ предметной области своевременной доставки грузов с использованием группировки робототехнических комплексов. В современном мире логистика играет ключевую роль в обеспечении бесперебойной работы городов и, в частности, мегаполисов. Современные мегаполисы стремятся к цифровизации и внедрению инновационных, интеллектуальных решений, направленных на повышение качества жизни населения. Концепция «Умный город» (Smart city) [8–10] – это совокупность цифровых технологий, которые автоматизировано управляют информационными и логистическими процессами. При реали-

зации логистических процессов могут использоваться различные РТК, например, грузовые беспилотные транспортные средства, беспилотные поезда, беспилотные транспортные средства, роботы-курьеры или роботы-доставщики. Поскольку доставка малогабаритных грузов на небольшие расстояния является наиболее востребованным типом доставки в мегаполисах, то в статье рассматривается решение транспортно-логистической задачи с использованием группировок РТК для доставки малогабаритных грузов.

С ростом количества транспортных средств, в том числе и РТК, задействованных в логистических процессах, увеличивается нагрузка на дорожную инфраструктуру и возрастает уровень загрязнения воздуха. В сравнении с личными транспортными средствами, грузовые транспортные средства проезжают в среднем в 1,5–2 раза больше. Это приводит к повышенному потреблению топлива и увеличению выбросов оксида азота. Внедрение роботизированных технологий в сферу логистики позволяет значительно снизить негативное воздействие на окружающую среду, делая доставку более экологичной, за счет использования электроэнергии. Однако применение РТК ведет к очевидной сложности, связанной необходимостью учета уровня заряда аккумуляторных батарей. Например, это может быть вызвано повышенным расходом электроэнергии при движении в гору и необходимостью обеспечить характеристики РТК для баланса между массой РТК и запасом его хода. Поэтому в рамках данного исследования рассматривается случай применения РТК в равнинной местности.

На данный момент на рынке существует множество компаний, занимающихся доставкой, однако использование РТК в этой сфере остается ограниченным. В России самым ярким и успешным примером использования для доставки РТК в режиме «по запросу» является Яндекс. Первые роботы-курьеры компании Яндекс появились на улицах городов России в ноябре 2019 года, и сегодня они доставляют товары в Москве (в столице их около 100 штук), в Иннополисе, в городе Мурино Ленинградской области, на курортах «Роза Хутор» и Красная Поляна в Сочи.

Для решения транспортно-логистических задач существует множество различных методов в теории расписаний [11]. Например, для нахождения первоначального опорного плана можно использовать метод двойного предпочтения, который находит близкое к оптимальному решение транспортной задачи. А использование дельта-метода вместе с методом потенциалов дает возможность найти оптимальный план с наибольшей скоростью вычислений. Однако, решаемая транспортно-логистическая задача своевременной доставки грузов в условиях мегаполиса с использованием группировок РТК для доставки [12, 13] малогабаритных грузов является сложной и многокритериальной. Существующие методы решения не учитывают необходимость своевременности доставки, использование группировки РТК с различными массогабаритными характеристиками перевозимых грузов.

Таким образом, с учетом текущих направлений развития и вызовов цифровой экономики необходимо разработать специальное модельно-алгоритмическое обеспечение [14] и его программный прототип для решения задачи оперативного планирования [15–17] своевременной доставки малогабаритных грузов в условиях мегаполиса с использованием группировки РТК.

Содержательная и формальная постановки транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки робототехнических комплексов. Транспортно-логистическая задача своевременной доставки малогабаритных грузов с использованием группировки РТК является сложной и многокритериальной, поэтому на первом этапе будем рассматривать задачу оперативного планирования [18–20] распределения грузов по РТК, которая будет описана с помощью статической модели.

При решении транспортно-логистической задачи, описанной в предыдущем разделе, будем предполагать, что известна группировка РТК, где для каждого конкретного объекта известны: грузоподъемность РТК, объем грузового контейнера РТК, емкость аккумуляторной батареи, минимально/максимально возможные значения скорости движения. Кроме того, нам известны пункты отправки грузов; пункты доставки грузов; информация о грузах, которые необходимо доставить или вернуть на склад, средняя стоимость

одного часа зарядки аккумуляторной батареи. РТК перевозят грузы, о которых известна следующая информация: масса; объем; пункт отправки и пункт доставки груза; а также статус груза («ожидает погрузку в РТК», «в пути», «доставлен» и «возврат на склад»). Под статусом понимаем этап транспортировки, на котором находится груз в текущий момент времени. Предполагается, что каждый РТК оборудован унифицированной многофункциональной аппаратурой (аппаратно-программным комплексом). Также необходимо учитывать, что Интернет-покрытие на территории выполнения доставок не является стабильным. В некоторых зонах связь с РТК не доступна. Поэтому процесс выполнения доставок делится на временные интервалы (участки).

Для описания статической модели были введены следующие множества и ограничения. Во-первых, ограничение на вместимость грузового отсека РТК. Во-вторых, на грузоподъемность РТК. В-третьих, необходимо учитывать время доставки груза и не выходить за поставленные сроки. В-четвертых, ограниченный объем аккумулятора РТК.

Все пункты отправки и доставки грузов обозначим, как (1):

$$O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}, \quad (1)$$

где n – количество пунктов.

Дистанции между пунктами отправки и пунктами выдачи представим в виде матрицы смежности, где 0 будет означать либо отсутствие прямого маршрута между пунктами, либо его непригодность для РТК.

Грузы, выразим (2):

$$G = \{G_1, G_2, \dots, G_g\}, \quad (2)$$

где g – количество грузов, которые необходимо доставить.

РТК обозначим (3):

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_s\}, \quad (3)$$

где s – количество РТК.

Все грузы необходимо доставить в указанные в исходных данных пункты. Дистанция, которую проедет РТК, будет равняться сумме расстояний из матрицы смежности между пунктами отправки и пунктами выдачи (4).

$$R = \sum_{i=1}^g r_i, \quad (4)$$

где $i \in \{1, 2, \dots, g\}$.

Для описания системы введем бинарную переменную – взаимосвязь груза и РТК (5). Переменная принимает значение равное 1, если связь между компонентами системы существует и 0 – если связь отсутствует.

$$x_{ij} \in \{0; 1\}, \quad (5)$$

где $j \in \{1, 2, \dots, s\}$.

Таким образом, была выполнена содержательная и формальная постановки транспортно-логистической задачи.

Статическая модель решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки робототехнических комплексов. Для решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки РТК необходимо описать статическую модель, которая будет выполнять распределение грузов по РТК и в дальнейшем будет рассчитываться прибыль от выполненных доставок. Статическая модель должна обеспечивать максимизацию прибыли от доставки грузов с учетом соблюдения временных интервалов доставки и оптимального использования РТК.

Целевая функция представлена формулой (6):

$$J = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^g \left(\frac{\delta_{G_i}}{t_i - T} * x_{ij} - \left(\frac{W_{S_j}}{Q_{S_j} * R_t} * D_{S_j} \right) * x_{ij} - t_i \right) \rightarrow \max, \quad (6)$$

где T – итоговое время доставки каждого груза, t_i – время доставки груза, A_i – расходы на перевозку груза, δ_{G_i} – доходы от доставки груза, Q_{S_j} – среднее время работы до полной разрядки батареи, D_{S_j} – средняя стоимость полной зарядки аккумулятора, W_{S_j} – средняя скорость движения РТК.

Математическая модель выражена формулами 7 и 8.

$$\sum_{a=1}^A \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^g m_{G_{ijca}} \leq \sum_{a=1}^A M_{S_{ja}} \quad (7)$$

$$\sum_{a=1}^A \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^g v_{G_{ijca}} \leq \sum_{a=1}^A V_{S_{ja}}, \quad (8)$$

где m_{g_i} – вес груза, M_{S_j} – грузоподъемность РТК, v_{g_i} – объем груза, V_{S_j} – объем грузового отсека РТК, А – участок временного интервала, С – статус груза.

Обозначим технические ограничения на вместимость грузовых контейнеров, в которых РТК перевозят грузы (9).

$$0 \leq v_{G_{ica}} \leq V, \quad (9)$$

где V – объем контейнера.

Также необходимо учесть технологические ограничения: каждый груз может перевозить только один РТК (10) и расчетное время доставки не должно превышать времени доставки, указанного в характеристиках груза (11).

$$\sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^g x_{ij} = 1 \quad (10)$$

$$0 \leq t_i \leq T_i. \quad (11)$$

Таким образом, была разработана статическая модель транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием РТК.

Алгоритм решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки робототехнических комплексов. Алгоритм решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием РТК должен решать задачу оперативного планирования доставок грузов, стремясь найти оптимальный способ распределения грузов по РТК и получить максимальную прибыль от доставки с учетом всех ограничений. Для получения требуемого результата в алгоритме используются методы линейного программирования.

Алгоритм решения транспортно-логистической задачи включает следующие шаги:

Шаг 1. Задание длительности интервала планирования доставок, количества и длительности участков интервала планирования доставок;

Шаг 2. Задание исходных данных: матрица смежности пунктов доставки и отправки товаров; масса и габариты грузов, которые необходимо доставить в рамках текущего участка интервала планирования; характеристики РТК;

Шаг 3. Решение задачи линейного программирования (6)-(11);

Шаг 4. Если решение найдено, то выполняется визуализация распределения грузов по РТК, иначе – вывод сообщения о необходимости скорректировать исходные данные;

Шаг 5. Расчет дистанции, которую проедет каждый РТК (4); времени доставки, прибыли от доставки для каждого груза;

Шаг 6. Вывод на печать значений показателей;

Шаг 7. Если участок интервала планирования доставок не последний, то переход к шагу 3;

Шаг 8. Подготовка полученных данных к дальнейшему использованию.

Таким образом, разработан алгоритм решения транспортно-логистической задачи, который определяет оптимальное распределение грузов по РТК и рассчитывает прибыль от выполненных доставок.

Анализ полученных результатов решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки робототехнических комплексов. Выполнена программная реализация специального модельно-алгоритмического обеспечения решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки РТК на языке программирования высокого уровня Python, а расчет задачи линейного программирования выполнялся с помощью библиотеки PuLP.

Рассмотрим пример решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием РТК и проведем анализ полученных результатов. В качестве примера возьмем характеристики роботов-доставщиков Яндексa, и рассмотрим город Иннополис как малый мегаполис с высоким уровнем развития цифровой экономики. Поскольку задача многокритериальная, а размер статьи ограничен, то рассмотрим

интервал планирования в 24 часа, который разделен на 3 участка постоянства структуры, в рамках которого необходимо доставить 12 малогабаритных грузов с использованием четырех РТК. Все РТК обладают одинаковыми техническими характеристиками: максимальная суммарная масса грузов, доступная к перевозке в одном РТК равняется 20 кг; объем грузового отсека РТК равен 0,06 м³; среднее время работы от аккумуляторной батареи – 8 часов; средняя стоимость полной зарядки аккумулятора – 40 рублей; максимальная скорость движения – 6,5 км/ч. В табл. 1 приведена матрица смежности между пунктами отправки и доставки грузов, а в табл. 2 – информация о грузах.

Таблица 1

Матрицы смежности между пунктами отправки и доставки малогабаритных грузов

Пункт отправки / доставки	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6
O_1	0	1	2	1,5	3	4
O_2	4	0	1	2	1,5	3
O_3	3	4	0	1	2	1,5
O_4	1,5	3	4	0	1	2
O_5	2	1,5	3	4	0	1
O_6	1	2	1,5	3	4	0

Таблица 2

Информация о малогабаритных грузах

Характеристики грузов / грузы	Масса, кг	Объем, м ³	t , моменты времени	№ пункта отправки	№ пункта доставки
G_1	6	0,01	2	1	3
G_2	13	0,025	4	1	4
G_3	2	0,04	7	2	5
G_4	0,5	0,01	8	1	6
G_5	5	0,02	8	1	7
G_6	6	0,01	3	2	8
G_7	15	0,01	5	1	9
G_8	7	0,03	6	1	10
G_9	10	0,01	2	1	11
G_{10}	0,3	0,01	5	2	12
G_{11}	0,6	0,03	6	2	13
G_{12}	2,5	0,025	4	1	14

В результате решения транспортно-логистической задачи был получен следующий план распределения грузов по РТК (рис. 1). Прибыль от доставки малогабаритных грузов составила 7500 рублей на первом участке, 4000 руб. на втором участке и 3000 руб. на третьем участке.

Проведем исследование влияния различных вариантов целевой функции на суммарную прибыль от доставок; количество доставок, доставленных не вовремя и общее количество выполненных заказов. Введем обозначения для используемых целевых функций: J_1 – максимизация прибыли и минимизация времени от доставки грузов (6); J_2 – максимизация прибыли от доставки грузов (15); J_3 – минимизация времени доставки грузов (16) и J_4 – минимизация количества РТК, задействованных в доставках (17).

$$J_2 = \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^g (\frac{\delta_{g_i}}{T-t_i} * x_{ij} - A_i * x_{ij}) \rightarrow \max \quad (15)$$

$$J_3 = \sum_{i=1}^g t_i \rightarrow \min \quad (16)$$

$$J_4 = \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^g x_{ij} \rightarrow \min. \quad (17)$$

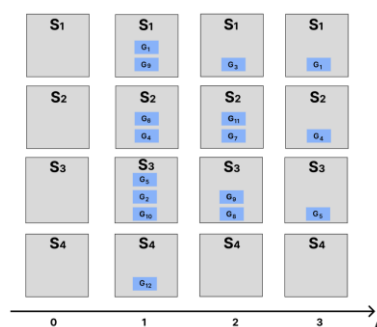


Рис. 1. Распределение грузов по РТК на каждом участке

Результаты решения транспортно-логистических задач с различными целевыми функциями и с различными исходными данными представлены в обобщенном виде на рис. 2, где нумерация графиков совпадает с введенными ранее обозначениями целевых функций.

В результате решения нескольких вариантов транспортно-логистической задачи с различными исходными данными было установлено, что с целевой функцией J_2 все заказы оказываются выполненными, однако не все грузы доставлены в срок, итоговая прибыль является наибольшей. В случае решения нескольких транспортно-логистических задач с теми же исходными данными с целевыми функциями J_1 и J_3 результаты оказываются близкими к друг другу, и все малогабаритные грузы доставлены до пунктов выдачи в срок. При решении нескольких транспортно-логистических задач с теми же исходными данными с целевой функцией J_4 , получили наибольшее количество малогабаритных грузов, доставленных не вовремя и наименьшее количество выполненных заказов, что определяет данный вариант решения задачи как наименее подходящий.

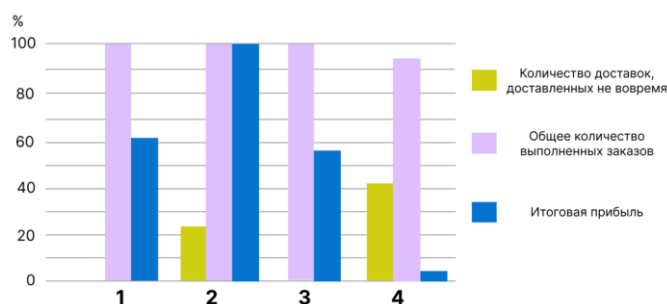


Рис. 2. Результаты решения транспортно-логистических задач с различными вариантами целевой функции

Таким образом, разработанный программный прототип специального модельно-алгоритмического обеспечения решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки РТК подтвердил свою работоспособность. Также в статье приведен пример решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки РТК, а также проведен анализ полученных результатов по четырем различным показателям. В результате, наилучшим вариантом целевой функции для решения транспортно-логистической задачи оказалась минимизация количества РТК, а наиболее подходящим вариантом – минимизация времени или одновременная минимизация времени и максимизация прибыли доставки малогабаритных грузов.

Заключение. Разработано специальное-модельно-алгоритмическое обеспечение и его программный прототип для решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки робототехнических комплексов. В статье реше-

на задача синтеза технологий (планов) своевременной доставки грузов с использованием группировки робототехнических комплексов. Проведенное исследование продолжает развитие основ многокритериального оперативного синтеза технологий [21, 22].

В дальнейшем следует провести следующие дополнительные исследования: разработка динамической модели программного управления логистических процессов в условиях современных городских систем при взаимодействии группировки робототехнических комплексов; согласование статической и динамической моделей [23–25]; разработка обобщенного алгоритма.

В статье рассмотрен пример решения задачи своевременной доставки малогабаритных грузов с использованием разработанного программного прототипа специального модельно-алгоритмического обеспечения для предметной области мегаполис в рамках концепции «Умный город».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Grigoreva E., Ushakov V. Meteorological Data Monitoring, Processing and Control Based on Internet of Things Technologies // *Digital Systems and Information Technologies in the Energy Sector: Lecture Notes in Networks and Systems* / ed. by Ilin I., Youzhong M. – Cham: Springer, 2025. – Vol. 1244. – P. 17. – DOI: 10.1007/978-3-031-80710-7_17.
2. Nekrasov A., Sinitsyna A. Proactive Management Transportation Logistics Infrastructure Life-Cycle (Digital Transformation) // *MATEC Web Conf.* – 2021. – 334 02019. – P. 1-6. – DOI: 10.1051/mateconf/202133402019.
3. Ivanov D., Sokolov B., Chen W., Dolgui A., Werner F., Potryasaev S. A control approach to scheduling flexibly configurable jobs with dynamic structural-logical constraints // *IIE Transactions.* – 2021. – Vol. 53, No. 1. – P. 21-38. – DOI: 10.1080/24725854.2020.1739787.
4. Ватолкина Н.Ш. Управление качеством в сфере услуг в условиях цифровой трансформации экономики. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – 179 с.
5. Липидус Л.В., Гостилов А.О., Омарова Ш.А. Особенности проникновения цифровых технологий в жизнь поколения Z: ценности, поведенческие паттерны и потребительские привычки интернет-поколения // *Государственное управление. Электронный вестник.* – 2020. – № 83. – С. 271-293. – DOI: 10.24411/2070-1381-2020-10119.
6. Вишневский К.О., Гохберг Л.М., Дементьев В.В. и др. Цифровые технологии в российской экономике / под ред. Л.М. Гохберга. – М.: НИУ ВШЭ, 2021. – 116 с. – DOI: 10.17323/978-5-7598-2199-1.
7. Гусев Д.А., Егорова Т.В. Проблемы планирования транспортного обеспечения поставок в условиях неопределенности // *Менеджмент сегодня.* – 2023. – Т. 1. – С. 44-54.
8. Appio F.P., Lima M., Paroutis S. Understanding Smart Cities: Innovation ecosystems, technological advancements, and societal challenges // *Technol. Forecast. Soc. Change.* – 2019. – Vol. 142. – P. 1-14. – DOI: 10.1016/j.techfore.2018.12.018.
9. Nahar P., Ghurayia A., Voronkov I.M., Kharlamov A.A. IoT System Architecture for a Smart City // *2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT).* – Vladikavkaz, Russian Federation, 2024. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/ICCT62929.2024.10874931.
10. Popov E., Strielkowski W., Vlasov M. Smart cities: knowledge generation effectiveness in the digital economy // *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference on Digital Economy (ISCDE 2019).* – Paris: Atlantis Press, 2019. – DOI: 10.2991/iscde-19.2019.2.
11. Lohmer J., Lasch R. Production planning and scheduling in multi-factory production networks: a systematic literature review // *International Journal of Production Research.* – 2021. – Vol. 59, Issue 7. – P. 2028-2054.
12. Maganha I., Silva C., Ferreira L.M.D.F. The sequence of implementation of reconfigurability core characteristics in manufacturing systems // *Journal of Manufacturing Technology Management.* – 2021. – Vol. 32, No. 2. – P. 356-375.
13. Müller T., Walth S., Jazdi N., Weyrich M. Identification of Reconfiguration Demand and Generation of Alternative Configurations for Cyber-Physical Production Systems // *Advances in Automotive Production Technology – Theory and Application* / ed. by Weißgraeber P., Heieck F., Ackermann C. – Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2021. – DOI: 10.1007/978-3-662-62962-8_8.
14. Захаров В.В., Соколов Б.В., Ушаков В.А. Специальное модельно алгоритмическое обеспечение планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных морских объектов // *Седьмая международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2023).* – 2023. – С. 96-103.

15. Ushakov V. Operational Planning and Scheduling of Information Processes During the Interaction of Group of an Intelligent Transport Technology Vehicle in an Airport Digital Space // *Digital Systems and Information Technologies in the Energy Sector: Lecture Notes in Networks and Systems* / ed. by Ilin I., Youzhong M. – Cham: Springer, 2025. – Vol. 1244. – P. 16. – DOI: 10.1007/978-3-031-80710-7_16.
16. Dolgui A., Ivanov D., Sethi S.P., Sokolov B. Scheduling in production, supply chain and Industry 4.0 systems by optimal control: fundamentals, state-of-the-art and applications // *International Journal of Production Research*. – 2019. – Vol. 57, No. 2. – P. 411-432. – DOI: 10.1080/00207543.2018.1442948.
17. Sokolov B., Ushakov V., Zakharov V. Optimal planning and scheduling of information processes during interaction among mobile objects // *International Journal of Production Research*. – 2024. – Vol. 62, Issue 16. – P. 5905-5924. – DOI: 10.1080/00207543.2024.2302388.
18. Marrouche W., Harmanani H. M. Heuristic approaches for the open-shop scheduling problem // *Information Technology-New Generations: 15th International Conference on Information Technology*. – Springer International Publishing, 2018. – P. 691-699.
19. Neufeld J.S., Schulz S., Buscher U. A systematic review of multi-objective hybrid flow shop scheduling // *European Journal of Operational Research*. – 2023. – Vol. 309, Issue 1. – P. 1-23.
20. Зимин И.Н., Иванюков Ю.П. Решение задач сетевого планирования сведением их к задачам оптимального управления // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. – 1971. – № 3. – С. 632-641.
21. Потрясаев С.А. Синтез технологий и комплексных планов управления информационными процессами в промышленном интернете: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.13.01, 05.13.11. – СПб., 2020. – 312 с.
22. Охмилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов: монография. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
23. Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: монография. – М.: РАН, 2018. – 314 с.
24. Захаров В.В., Баранов А.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Модели и алгоритмы централизованного и децентрализованного планирования применения группировки подвижных объектов на основе теории дифференциальных игр // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2023. – № 4. – Ч. 1. – С. 171-178. – DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.021>.
25. Мусеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 488 с.

REFERENCES

1. Grigoreva E., Ushakov V. Meteorological data monitoring, processing and control based on internet of things technologies, *Digital Systems and Information Technologies in the Energy Sector: Lecture Notes in Networks and Systems*, ed. by Ilin I., Youzhong M. Cham: Springer, 2025, Vol. 1244, pp. 17. DOI: 10.1007/978-3-031-80710-7_17.
2. Nekrasov A., Sinitsyna A. Proactive management transportation logistics infrastructure life-cycle (Digital Transformation), *MATEC Web Conf.*, 2021, 334 02019, pp. 1-6. DOI: 10.1051/mateconf/202133402019.
3. Ivanov D., Sokolov B., Chen W., Dolgui A., Werner F., Potryasaev S. A control approach to scheduling flexibly configurable jobs with dynamic structural-logical constraints, *IIE Transactions*, 2021, Vol. 53, No. 1, pp. 21-38. DOI: 10.1080/24725854.2020.1739787.
4. Vatulkina N.Sh. Upravlenie kachestvom v sfere uslug v usloviyakh tsifrovoy transformatsii ekonomiki [Quality management in the service sector in the context of digital economic transformation]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2019, 179 p.
5. Lapidus L.V., Gostilovich A.O., Omarova Sh.A. Osobennosti proniknoveniya tsifrovyykh tekhnologiy v zhizn' pokoleniya Z: tsennosti, povedencheskie patterny i potrebitel'skie privychki internet-pokoleniya [The impact of digital technologies on generation Z: values, behavioral patterns, and consumer habits of the internet generation], *Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyy vestnik* [State Administration. Electronic Bulletin], 2020, No. 83, pp. 271-293. DOI: 10.24411/2070-1381-2020-10119.
6. Vishnevskiy K.O., Gokhberg L.M., Dement'ev V.V. i dr. Tsifrovye tekhnologii v rossiyskoy ekonomike [Digital technologies in the Russian economy], ed. by L.M. Gokhberga. Moscow: NIU VShE, 2021, 116 p. DOI: 10.17323/978-5-7598-2199-1.
7. Gusev D.A., Egorova T.V. Problemy planirovaniya transportnogo obespecheniya postavok v usloviyakh neopredelennosti [Problems of transport supply planning in conditions of uncertainty], *Menedzhment segodnya* [Management Today], 2023, Vol. 1, pp. 44-54.
8. Appio F.P., Lima M., Paroutis S. Understanding Smart Cities: Innovation ecosystems, technological advancements, and societal challenges, *Technol. Forecast. Soc. Change.*, 2019, Vol. 142, pp. 1-14. DOI: 10.1016/j.techfore.2018.12.018.

9. Nahar P., Ghuraiya A., Voronkov I.M., Kharlamov A.A. IoT System architecture for a smart city, 2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). Vladikavkaz, Russian Federation, 2024, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICCT62929.2024.10874931.
10. Popov E., Strielkowski W., Vlasov M. Smart cities: knowledge generation effectiveness in the digital economy, *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference on Digital Economy (ISCDE 2019)*. Paris: Atlantis Press, 2019. DOI: 10.2991/iscde-19.2019.2.
11. Lohmer J., Lasch R. Production planning and scheduling in multi-factory production networks: a systematic literature review, *International Journal of Production Research*, 2021, Vol. 59, Issue 7, pp. 2028-2054.
12. Maganha I., Silva C., Ferreira L.M.D.F. The sequence of implementation of reconfigurability core characteristics in manufacturing systems, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2021, Vol. 32, No. 2, pp. 356-375.
13. Müller T., Walth S., Jazdi N., Weyrich M. Identification of reconfiguration demand and generation of alternative configurations for cyber-physical production systems, *Advances in Automotive Production Technology – Theory and Application*, ed. by Weißgraeber P., Heieck F., Ackermann C. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2021. DOI: 10.1007/978-3-662-62962-8_8.
14. Zakharov V.V., Sokolov B.V., Ushakov V.A. Spetsial'noe model'no algoritmicheskoe obespechenie planirovaniya informatsionnykh protsessov pri vzaimodeystvii gruppirovki podvizhnykh morskikh ob'ektov [Special model-algorithmic support for planning information processes in the interaction of a group of mobile maritime objects] *Sed'maya mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Imitatsionnoe i kompleksnoe modelirovanie morskoy tekhniki i morskikh transportnykh sistem» (IKM MTMTS-2023)* [7th International Scientific and Practical Conference on Simulation and Complex Modeling of Marine Technology and Marine Transport Systems (IKM MTMTS-2023)], 2023, pp. 96-103.
15. Ushakov V. Operational planning and scheduling of information processes during the interaction of group of an intelligent transport technology vehicle in an airport digital space, *Digital Systems and Information Technologies in the Energy Sector: Lecture Notes in Networks and Systems*, ed. by Ilin I., Youzhong M. Cham: Springer, 2025, Vol. 1244, pp. 16. DOI: 10.1007/978-3-031-80710-7_16.
16. Dolgui A., Ivanov D., Sethi S.P., Sokolov B. Scheduling in production, supply chain and Industry 4.0 systems by optimal control: fundamentals, state-of-the-art and applications, *International Journal of Production Research*, 2019, Vol. 57, No. 2, pp. 411-432. DOI: 10.1080/00207543.2018.1442948.
17. Sokolov B., Ushakov V., Zakharov V. Optimal planning and scheduling of information processes during interaction among mobile objects, *International Journal of Production Research*, 2024, Vol. 62, Issue 16, pp. 5905-5924. DOI: 10.1080/00207543.2024.2302388.
18. Marrouche W., Harmanani H. M. Heuristic approaches for the open-shop scheduling problem, *Information Technology-New Generations: 15th International Conference on Information Technology*. Springer International Publishing, 2018, pp. 691-699.
19. Neufeld J.S., Schulz S., Buscher U. A systematic review of multi-objective hybrid flow shop scheduling, *European Journal of Operational Research*, 2023, Vol. 309, Issue 1, pp. 1-23.
20. Zimin I.N., Ivanilov Yu.P. Reshenie zadach setevogo planirovaniya svedeniem ikh k zadacham optimal'nogo upravleniya [Solving network planning problems by reducing them to optimal control problems], *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics], 1971, No. 3, pp. 632-641.
21. Potryasaev S.A. Sintez tekhnologiy i kompleksnykh planov upravleniya informatsionnymi protsessami v promyshlennom internete: diss. ... d-ra tekhn. nauk [Synthesis of Technologies and Comprehensive Management Plans for Information Processes in the Industrial Internet: dr. of eng. sc. diss.]: 05.13.01, 05.13.11. Saint Petersburg, 2020, 312 p.
22. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Intellektual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob'ektov: monografiya [Intelligent monitoring and management technologies for the structural dynamics of complex technical objects]. Moscow: Nauka, 2006, 410 p.
23. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Kvalimetriya modeley i polimodel'nykh kompleksov: monografiya [Qualimetry of models and multi-model complexes]. Moscow: RAN, 2018, 314 p.
24. Zakharov V.V., Baranov A.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Modeli i algoritmy tsentralizovannogo i detsentralizovannogo planirovaniya primeneniya gruppirovki podvizhnykh ob'ektov na osnove teorii differentsial'nykh igr [Models and algorithms for centralized and decentralized scheduling of the application of grouping moving objects based on the theory of differential games], *Morskije intellektual'nye tekhnologii* [Marine Intellectual Technologies], 2023, No. 4, Part 1, pp. 171-178. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.021>.
25. Moiseev N.N. Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza [Mathematical problems of systems analysis]. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1981, 488 p.

Григорьева Елизавета Дмитриевна – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; e-mail: lizarapne@gmail.com; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89030987631; магистрант.

Ушаков Виталий Анатольевич – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; e-mail: ushakov@guap.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88124947053; к.т.н.; доцент.

Grigoreva Elizaveta Dmitrievna – St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: lizarapne@gmail.com; St. Petersburg, Russia; phone: +79030987631; master's student.

Ushakov Vitaly Anatolevich – St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: ushakov@guap.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +78124947053; associate professor, cand. of eng. sc.

Раздел II. Системы управления и моделирование

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-162-175

А.Н. Карапеев, Е.Ю. Косенко, М.Ю. Медведев, В.Х. Пшихопов

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ МЕТОДА ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

Предложен и исследован алгоритм адаптивного управления двигателем постоянного тока, базирующийся на применении технологии машинного обучения с подкреплением. Дан обзор и краткий анализ состояния дел в области интеллектуальных систем управления приводами. Представлено математическое описание двигателя, приведена структурная схема обучения интеллектуального агента. Предложена интеллектуальная система адаптивного управления скоростью вращения двигателя, при построении которой двигатель представляется в виде черного ящика с заданными ограничениями на вход и выход. Система управления строится на базе алгоритма Q-обучения нулевого порядка. Предполагается, что выходом интеллектуального агента является управление, подаваемое на вход двигателя. Экспериментальным путем подобрано множество таких управлений, позволяющих реализовать заданную точность поддержания частоты вращения. В интеллектуальной системе используются приближенные табличные оценки ценности каждого из управлений в зависимости от желаемой и текущей частоты вращения двигателя. В настоящей статье проведено исследование влияния дискретности представления значений состояния, используемого множества управляющих воздействий, применяемых вознаграждений, а также параметров алгоритма обучения на ошибку управления. Исследована чувствительность интеллектуальной системы управления к изменению параметров моделируемого двигателя и не измеряемому моменту сопротивления на валу двигателя. По результатам проведенного исследования сделан вывод о необходимости использования модифицированного алгоритма, в котором предполагается измерение или оценка тока статорной обмотки двигателя и использование непрерывного управления. В данной постановке задачи алгоритм управления обеспечивает робастность к переменным параметрам и внешнему возмущению. Также обсуждаются вопросы аппроксимации функции ценности управления с помощью полиномов и с применением нейронной сети. Показана возможность высокой точности аппроксимации с помощью нейронной сети простой структуры.

Адаптивное управление двигателем; обучение с подкреплением; робастное управление; Q-алгоритм обучения; нейронная сеть.

A.N. Karapeev, E.Y. Kosenko, M.Yu. Medvedev, V.Kh. Pshikhopov

RESEARCH OF AN INTELLIGENT ADAPTIVE CONTROL ALGORITHM BASED ON THE REINFORCEMENT LEARNING METHOD

An algorithm for adaptive control of a DC motor based on the use of machine learning technology with reinforcement is proposed and investigated. An overview and brief analysis of the state of affairs in the field of intelligent motor control systems is given. A mathematical model of the DC motor is presented, and a structural scheme for training an intellectual agent is presented. An intelligent adaptive motor speed control system is proposed. The DC motor is represented as a black box with the limited input and output. The control system is based on a zero-order Q-learning algorithm. It is assumed that the output of the intelligent agent is a control applied to the motor input. The intelligent system uses a tabular approximation of the value of each of the control action. In this article, we study the effect of the discreteness of the representation of state, the set of control effects used, the applied rewards, and the parameters of the learning algorithm on the control error. The sensitivity of the control system to the parameters of the motor and an unmeasured moment is investigated. Based on the results of the study, a modified algorithm is proposed, which assumes the measurement or evaluation of the current of the motor stator. The control algorithm provides robustness to parameters and external disturbance. Additionally, the approximation of the control value function using polynomials and using a neural network are investigated.

Adaptive control of DC motor; reinforcement learning; robust control; Q-algorithm; neural network.

Введение. В настоящее время набирают популярность методы интеллектуального планирования и управления, базирующиеся на машинном обучении. Наилучшие результаты алгоритмы, основанные на методах обучения, достигнуты в обработке изображений, текстов и сигналов [1–6]. В указанных областях результаты, которые демонстрируют алгоритмы, базирующиеся на глубоких нейронных сетях, превосходят возможности человека. Также глубокие нейронные сети успешно решают задачи планирования пути по заданной карте [7, 8].

С развитием методов обучения с подкреплением [9] глубокие нейронные сети получили возможность решать задачи планирования и управления в динамических системах [10–12]. При этом могут использоваться как относительно простые Q-методы глубокого обучения с подкреплением [13–15], так и более сложные методы, такие как детерминированный градиент политики DPG [16, 17].

Наибольшую сложность представляют собой задачи управления динамическими системами с гарантией асимптотической устойчивости или ограниченности сигнала ошибки. При этом основную проблему представляет теоретическое обоснование устойчивости замкнутой системы с нейросетевым регулятором [18]. В той связи наиболее распространенной схемой применения нейронных сетей является их сочетание с классическими регуляторами [19–21].

Текущий уровень практических задач, которые решаются методами глубокого обучения с подкреплением, говорят о возможности их применения для управления динамическими объектами [9, 22].

Актуальность настоящего исследования обусловлена следующими факторами. В настоящее время существует большое количество методов адаптивного и робастного управления динамическими объектами [23, 24]. В частности, в системах управления приводами существуют промышленные технологии автоматической настройки ПИД-регуляторов, которые обеспечивают требуемое качество функционирования в заданных режимах. Однако, существующие аналитические алгоритмы адаптивного управления базируются на математических моделях, в которых выделяются неопределенные параметры, структурные элементы и возмущения. Кроме того, адаптивный подход требует определения эталонных свойств замкнутой системы управления, что в отсутствие математической модели объекта вызывает затруднения.

Основное преимущество глубокого обучения с подкреплением – возможность разработать алгоритм управления динамическим объектом, как черным ящиком, на основе минимально доступной информации. Обычно требуется знать ограничения на вход и выход объекта, а также рабочую область пространства состояний динамической системы.

Вместе с тем, кроме проблемы обеспечения асимптотической устойчивости желаемого положения равновесия замкнутой системы, существует ряд дополнительных сложностей при применении методов обучения с подкреплением.

Первой проблемой является обоснованная настройка параметров обучения с подкреплением, включая коэффициент обучения, вознаграждения, коэффициент обесценивания [9, 22]. Обоснованный выбор указанных параметров существует только для частных случаев, которые описывают отдельные режимы и относительно простые задачи. В более сложных случаях, в которых применяются нейронные сети, дополнительно требуется разрабатывать рациональную архитектуру нейронной сети, выбрать ее настройки и гиперпараметры обучения.

Вторая проблема заключается в том, что основным инструментом обучения с подкреплением является виртуальная среда моделирования, требующая использования модели управляемого объекта [9, 22]. Иными словами, объект рассматривается в виде «черного ящика» в замкнутой системе управления, однако обучение на реальном объекте связано с рисками, обусловленными подачей на вход не соответствующих текущему состоянию управляющих воздействий. В этой связи на этапе обучения с применением виртуальной среды необходима адекватная модель объекта управления. В ней возможно варьирование параметров, структуры и возмущений, однако перенос на реальный объект, как правило, требует дообучения. Такой подход не всегда возможен в силу требований безопасности и надежности.

Третья проблема заключается в необходимости обучать алгоритм управления при различных сочетаниях начальных значений переменных состояния, задающего и возмущающих воздействий, параметрических и структурных возмущений. Указанная необходимость приводит к значительному числу итераций обучения для достижения приемлемого качества управления. В свою очередь, большое число итераций обучения обуславливает необходимость применения специализированных вычислительных средств, что ограничивает использование технологий глубокого обучения с подкреплением в инженерной практике.

В настоящей статье разрабатывается и исследуется методика синтеза адаптивного управления динамическим объектом на примере двигателя, базирующаяся на методе обучения с подкреплением. Предлагается и исследуется базовая методика, в рамках которой рассматривается модель двигателя с неизвестными постоянными параметрами, которые не изменяются в ходе обучения и при функционировании системы управления. На основе исследования формулируются условия выбора параметров обучения. Далее, на основе полученных результатов, разрабатывается методика решения задачи управления более общего вида, когда параметры двигателя неизвестны, постоянны, но варьируются в ходе обучения и в замкнутой системе управления. Проводится анализ полученной методики и даются рекомендации по выбору параметров обучения.

I. Постановка задачи. Рассмотрим систему с интеллектуальным агентом, представленную на рис. 1. Система состоит из двигателя Д и интеллектуального агента А. Выходной измеряемой переменной является частота вращения двигателя ω . Входным воздействием является напряжение u , подаваемое на двигатель. Агенту также задается желаемая частота вращения двигателя ω_0 .

В качестве объекта управления рассматривается модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, которая описывается уравнениями [25]:

$$\begin{aligned} J \frac{d\omega(t)}{dt} &= k_m I - M_l, \\ L \frac{dI(t)}{dt} &= u - k_m \omega - rI, \end{aligned} \quad (1)$$

где ω – частота вращения вала двигателя, находящееся в интервале $[\omega_{min}, \omega_{max}]$; I – ток статорной обмотки; u – напряжение, подаваемое на статор, находящееся в интервале $[u_{min}, u_{max}]$; M_l – момент нагрузки; J, L, r, k_m – постоянные параметры.

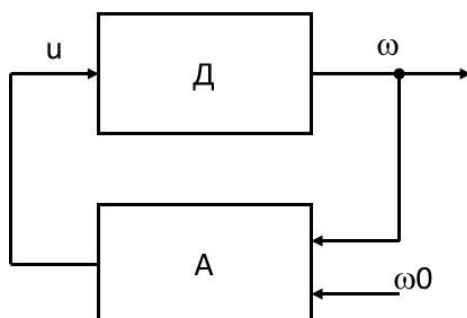


Рис. 1. Структура системы управления с интеллектуальным агентом.

Требуется разработать методику обучения с подкреплением агента А, которая должна включать обоснование алгоритма и параметров обучения, в том числе выбор подаваемых управляющих воздействий из множества $u \in \{u_i\}, i=1,2,\dots,N_u$, вознаграждений R из множества $R \in \{R_j\}, j=1,2,\dots,N_R$, шага обучения α , коэффициента обесценивания γ .

II. Решение задачи. Вначале будем полагать, что параметры двигателя J, L, r, k_m и момент нагрузки M_l являются неизвестными, но постоянными на всем протяжении обучения и дальнейшего функционирования замкнутой системы управления.

Рассмотрим вариант, при котором на вход двигателя Д подается управляющее воздействие из следующего множества $u \in \{-umax, 0, +umax\}$. Вознаграждение R на шаге будем вычислять в соответствии с выражением [9]:

$$\begin{aligned} R &= -1, \text{ if } \omega \neq \omega_0, \\ R &= 0, \text{ if } \omega = \omega_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Данная постановка относится к классу задач, решаемых классическими методами обучения с подкреплением [9]. Для ее решения применим подход, заключающийся в построении дискретных оценок функций ценности действий. Для этого разобьем интервал $[\omega_{min}, \omega_{max}]$ на $N\omega$ дискретных интервалов. Полагая, что желаемые значения частота вращения двигателя ω_0 задаются в том же диапазоне $[\omega_{min}, \omega_{max}]$, разобьем диапазон значений ω_0 также на $N\omega$ дискретных интервалов. Тогда наблюдаемое состояние системы в момент времени t можно описать вектором $I - St = [\omega k, \omega_0 k]^T$. В каждом состоянии St агент может предпринять действие $A_t \in \{-umax, 0, +umax\}$. Необходимо найти алгоритм, обеспечивающий выбор действия с максимальной ценностью в каждом состоянии.

Известно, что методы на основе временных различий сходятся быстрее, чем методы Монте-Карло [9, 26]. В этой связи будем использовать метод Q-обучения нулевого порядка [9], который относится к методам обучения с разделенной стратегией и описывается выражением:

$$Q(S_t, A_t) \leftarrow Q(S_t, A_t) + \alpha [r_{t+1} + \gamma \max_a Q(S_{t+1}, a) - Q(S_t, A_t)], \quad (3)$$

где $Q(S_t, A_t)$ – ценность действия A_t в состоянии S_t ; r_{t+1} – вознаграждение на шаге $t+1$; α – шаг обучения; γ – коэффициент обучения.

Преимуществом метода Q-обучения является тот факт, что относясь к методам с разделенной стратегией, он допускает использование ϵ -жадного алгоритма [27, 28] в процессе обучения и жадного алгоритма в процессе функционирования обученного агента.

Целью обучения является максимизация вознаграждения, определяемого выражением [9]:

$$G_t = R_{t+1} + \gamma R_{t+2} + \gamma^2 R_{t+3} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{t+k+1}. \quad (4)$$

Для оценки качества функционирования замкнутой системы управления будем использовать среднеквадратическое отклонение СКО частоты вращения ω от желаемого значения ω_0 в установившемся режиме.

Проведем приближенное исследование Q-алгоритма обучения на устойчивость. Для этого представим уравнение 1 в дискретной форме, используя численный метод интегрирования прямоугольниками. В результате получим:

$$\begin{aligned} \omega_{k+1} &= \omega_k + \frac{dt}{J} (k_m I_k - M_{lk}), \\ I_{k+1} &= I_k + \frac{dt}{L} (u_k - k_m \omega_k - r I_k), \end{aligned} \quad (5)$$

где dt – шаг интегрирования; $\omega_k, I_k, u_k, M_{lk}$ – значения переменных состояния и воздействий в момент времени k .

При исследовании устойчивости будем полагать задающее воздействие $\omega_0 = 0$ и момент сопротивления $M_l = 0$.

Введем в рассмотрение следующую положительно определенную функцию:

$$V_k = \omega_k^2 + Q_k^2(\omega_k, u_k). \quad (6)$$

где $Q_k(\omega_k, u_k)$ – оценка ценности действия u_k в состоянии ω_k .

Рассмотрим момент времени $k+1$ и разность

$$\Delta V_k = V_{k+1} - V_k = \omega_{k+1}^2 + Q_{k+1}^2(\omega_{k+1}, u_{k+1}) - \omega_k^2 - Q_k^2(\omega_k, u_k). \quad (7)$$

Подставим в 7 выражения 3, 5 :

$$\Delta V_k = \left(\omega_k + \frac{dt}{J} k_m I_k \right)^2 + [Q_k + \alpha (R_{k+1} + \max_u Q'_k - Q_k)]^2 - \omega_k^2 - Q_k^2, \quad (8)$$

где $Q'_k = Q(\omega_{k+1}, u)$. Также для краткости введено обозначение $Q_k = Q_k(\omega_k, u_k)$.

Раскроем в выражении 8 скобки и сократим подобные:

$$\Delta V_k = 2 \frac{dt}{J} k_m \omega_k I_k + \left(\frac{dt}{J} k_m I_k \right)^2 + 2\alpha Q_k (R_{k+1} + \max_u Q'_k - Q_k) + [\alpha (R_{k+1} + \max_u Q'_k - Q_k)]^2. \quad (9)$$

В силу того, что нулевое положение равновесия двигателя постоянного тока 1 является асимптотически устойчивым, и в силу ограниченных значений управления u переменные ω_k, I_k также ограничены. Тогда при достаточно малом шаге интегрирования $dt \rightarrow 0$, первые 2 слагаемых выражения 9 можно отбросить в силу их малости. В результате получим выражением

$$\Delta V_k = 2\alpha Q_k (R_{k+1} + \max_u Q'_k - Q_k) + [\alpha (R_{k+1} + \max_u Q'_k - Q_k)]^2. \quad (10)$$

Преобразуем последнее выражение:

$$\Delta V_k = \alpha (R_{k+1} + \max_u Q'_k - Q_k) (2Q_k + \alpha (R_{k+1} + \max_u Q'_k - Q_k)). \quad (11)$$

Учитывая, что вознаграждения $R_{k+1} \leq 0$, значения полезности также отрицательны $Q_k \leq 0$. Тогда можно записать

$$R_{k+1} + \max_u Q'_k - Q_k \leq R_{k+1} - Q_k \leq -Q_k. \quad (12)$$

Учитывая неравенство 12 получим

$$\Delta V_k \leq -\alpha (2 - \alpha) Q_k^2. \quad (13)$$

Согласно выражению 13, разность ΔV_k 7 является не положительно определенной при выполнении условий $0 < \alpha < 2$, что соответствует известным условиям сходимости алгоритмов обучения [19].

Таким образом, доказано следующее утверждение.

Утверждение. Алгоритм обучения 3 с вознаграждением 2 и управлением $u = \max_u Q_k(\omega_k, u_k)$, $u \in \{-u_{\max}, 0, +u_{\max}\}$ обеспечивает асимптотическую сходимость функции полезности $Q_k(\omega_k, u_k)$ к постоянным значениям и ограниченность частоты вращения двигателя ω_k , описываемой дискретной моделью 5.

Для численного исследования зависимости СКО от параметров обучения будем осуществлять обучение агента и моделирование системы, представленной на рис. 1, с обученным агентом при различных шагах обучения и коэффициенте обучения. В табл. 1 представлены результаты такого исследования при вознаграждении, определяемом выражением 2, жадном алгоритме обучения $\varepsilon = 0$, числе эпизодов 80 000, 8 000 шагов обучения в каждом эпизоде. Параметры двигателя равны: $J = 0.2$; $k = 1.0$; $M = 0.1$; $L = 0.1$; $r = 1.0$. Значение $u_{\max} = 1$, а частота вращения ограничена интервалом $[0, 1]$.

Таблица 1

Зависимость СКО от шага обучения и коэффициента обесценивания для $u \in \{-u_{\max}, 0, +u_{\max}\}$

α	γ	1.0	0.98	0.94	0.9
0.03		0.063	0.063	0.061	0.05
0.05		0.063	0.063	0.057	0.069
0.07		0.031	0.057	0.041	0.55
0.1		0.045	0.058	0.56	0.058

На рис. 2 представлен пример переходных процессов при функционировании обученного интеллектуального Q-агента. На рис. 2,а хорошо заметно смещение среднего значения выходной величины относительно уставки. Это смещение обусловлено использованием функции максимума в выражении 3, которое приводит к смещению получаемых оценок функции полезности [9]. Для решения этой проблемы можно использовать двойное Q-обучение – DQ метод [9, 29].

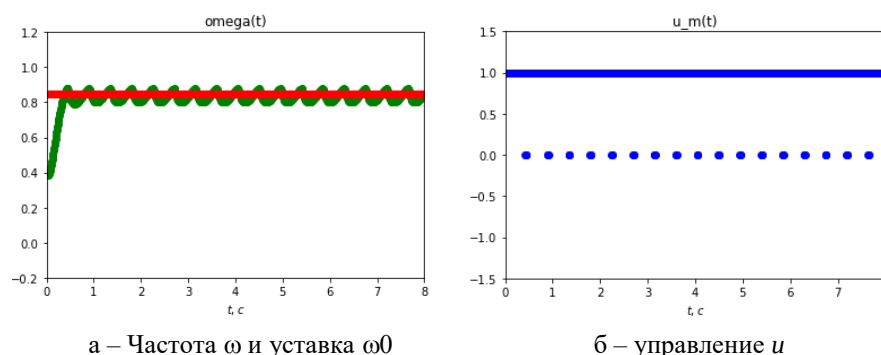


Рис. 2. Переходные процессы в замкнутой системе (1) – (3) при $u \in \{-u_{\max}, 0, +u_{\max}\}$

Наличие колебаний на рис. 2 ожидаемо, они обусловлены релейным характером применяемого управления. Как видно из табл. 1 коэффициент обесценивания может быть принят равным $\gamma = 1$. Относительно шага обучения α наблюдается минимум в районе значения $\alpha = 0.07$.

Исследуем теперь возможности по уменьшению ошибки управления. Вначале рассмотрим, как влияет увеличение числа возможных управлений в множестве u . Зависимость СКО от шага обучения и коэффициента обесценивания для $u \in \{-u_{\max}, -u_{\max}/2, 0, +u_{\max}/2, +u_{\max}\}$ представлена в табл. 2.

Таблица 2

**Зависимость СКО от шага обучения и коэффициента обесценивания
для $u \in \{-u_{\max}, -u_{\max}/2, 0, +u_{\max}/2, +u_{\max}\}$**

α	γ	1.0	0.98	0.94	0.9
0.03		0.061	0.267	0.092	0.132
0.05		0.046	0.04	0.109	0.69
0.07		0.056	0.131	0.707	0.698
0.1		0.046	0.097	0.703	0.696

Сравнение средней ошибки для различного сочетания параметров α и γ показывает, что для $\alpha = \{0.03, 0.05, 0.07, 0.1\}$ и $\gamma = \{1.0, 0.98, 0.94, 0.9\}$ среднее значение СКО для $u \in \{-u_{\max}, 0, +u_{\max}\}$ составляет 0.118. Среднее значение СКО для $u \in \{-u_{\max}, -u_{\max}/2, 0, +u_{\max}/2, +u_{\max}\}$ составляет 0.286.

На рис. 3 представлены графики изменения частоты вращения двигателя и управляющего воздействия при $\alpha = 0.1$ и $\gamma = 1.0$. Результаты численных исследований показывают, что введение дополнительных ступеней управления позволяют снизить амплитуду колебаний частоты вращения двигателя ω относительно заданного желаемого значения ω_0 . Однако, при это возрастает постоянное смещение относительно желаемого значения ω_0 .

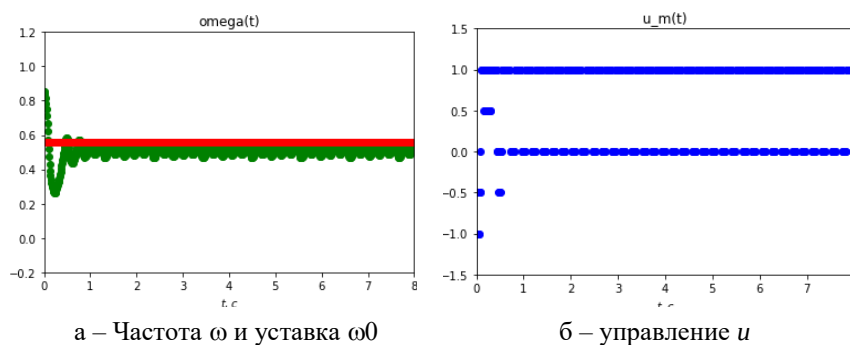


Рис. 3. Переходные процессы при $u \in \{-u_{\max}, -u_{\max}/2, 0, +u_{\max}/2, +u_{\max}\}$

Из табл. 1 и 2 следует, что одновременное увеличение шага обучения α и уменьшение коэффициента обесценивания γ приводит к росту СКО. Это обусловлено тем, что с ростом α и уменьшением γ увеличивается число эпизодов, в которых управление, выбираемое в соответствии с максимумом

$$u_k = \max_u Q_k(\omega_k, u_k). \quad (14)$$

не приводит к успешной стабилизации частоты вращения двигателя ω в окрестности значения ω_0 . В связи с этим, далее при исследовании будем выбирать небольшие значения $\alpha \leq 0.07$ параметр γ , равный или близкий к 1.

Отметим, что при малых значениях α и значениях γ , близких к 1, наблюдается стабилизация частоты вращения двигателя в окрестности ω_0 . При этом, СКО управления примерно равна 1–1.5 от величины дискретизации непрерывного пространства ω, ω_0 . Для результатов, представленных в табл. 1 и 2, размер ячейки равен 0.05×0.05 .

Дальнейшее введение дополнительных ступеней в управляющие воздействия может приводить к уменьшению амплитуды колебаний выходной величины двигателя, однако не устранил эти колебания полностью. Кроме того, известно [9], что в дискретной форме Q-метод хорошо работает для относительно небольшого множества возможных управляющих воздействий. В противном случае необходимо переходить к задаче непрерывного управления, что требует применения методов аппроксимации функций ценности, в том числе с использованием нейронных сетей.

Основываясь на проведенном исследовании, рассмотрим три важных аспекта применения метода Q-обучения для управления динамическими объектами. Первым аспектом является способ назначения вознаграждения, вторым – способ формирования управления, который не требует рассмотрения непрерывной задачи управления, а третьим – размер ячейки при дискретизации непрерывного пространства.

III. Исследование способов дискретизации, назначения вознаграждения и формирования управления. Рассмотрим вначале влияние размера ячейки дискретизации пространства ω, ω_0 , так как этот параметр наиболее сильно сказывается на вычислительных затратах на проведение исследований. При разбиении среды на 30×30 ячеек размеры ячейки 0.333×0.333 для обучения Q-алгоритма потребовалось 240 000 эпизодов, что оказалось приемлемым с точки зрения времени, затрачиваемого на обучение алгоритма управления.

В табл. 3 представлены результаты сравнения погрешности управления для рассматриваемой задачи при дискретизации 30×30 ячеек и 20×20 ячеек, $u \in \{-umax, -umax/2, 0, +umax/2, +umax\}$, $\gamma=1$.

Таблица 3

Сравнение СКО при дискретизации 30×30 ячеек и 20×20 ячеек

α	0.03	0.05	0.07
СКО 20×20	0.061	0.046	0.056
СКО 30×30	0.039	0.044	0.028

На рис. 4 представлены переходные процессы в замкнутой системе в одном из эпизодов при $\alpha=0.03$.

Из табл. 3 следует, что среднее значение СКО при дискретизации 30×30 ячеек равно 0.037, что равно 1,12 от размера ячейки. Для дискретизации 20×20 ячеек среднее значение СКО равно 0.054, что приблизительно составляет 1,09 от размера ячейки. Таким образом, уменьшение размера ячейки привело к почти пропорциональному уменьшению ошибки управления.

С точки зрения обучения с подкреплением, особенность рассматриваемой задачи заключается в том, что в данном случае известна ошибка управления, что дает возможность сформировать на ее основе вознаграждение. Рассмотрим вариант, в которой вознаграждение на отдельном шаге равно взятому с минусом квадрату ошибки управления:

$$R_k = -(\omega_0 - \omega)^2. \quad (15)$$

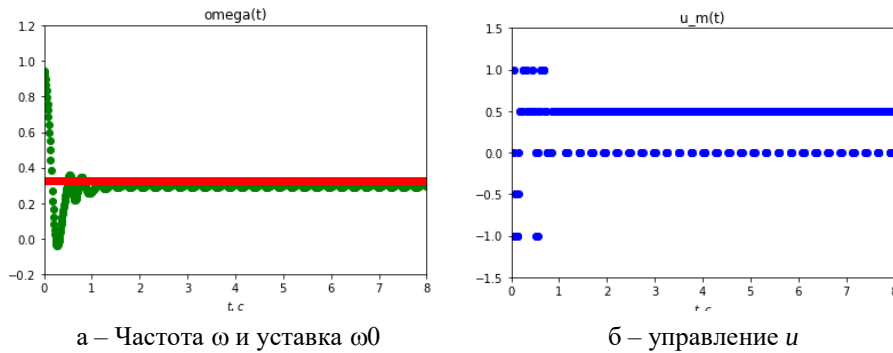


Рис. 4. Переходные процессы при $u \in \{-u_{\max}, -u_{\max}/2, 0, +u_{\max}/2, +u_{\max}\}$ и дискретизации 30×30 ячеек

В табл. 4 представлена СКО замкнутой системы управления, обученной Q-методом с вознаграждением 15 при дискретизации 30×30 ячеек, $u \in \{-u_{\max}, -u_{\max}/2, 0, +u_{\max}/2, +u_{\max}\}$, $\gamma=1$.

Таблица 4

СКО при дискретизации 30×30 ячеек $u \in \{-u_{\max}, -u_{\max}/2, 0, +u_{\max}/2, +u_{\max}\}$, $\gamma=1$ и вознаграждении (15)

α	0.03	0.05	0.07
СКО	0.028	0.025	0.023

Согласно табл. 4 среднее СКО равно около 0.025, что составляет 0.76 от размера ячейки дискретизации пространства. Также отметим, что при вознаграждении 15 существенно снижается смещение СКО ошибки управления относительно 0. На рис. 5 представлены результаты моделирования замкнутой системы, обученной Q-методом с вознаграждением 15, из которых видно отсутствие указанного смещения.

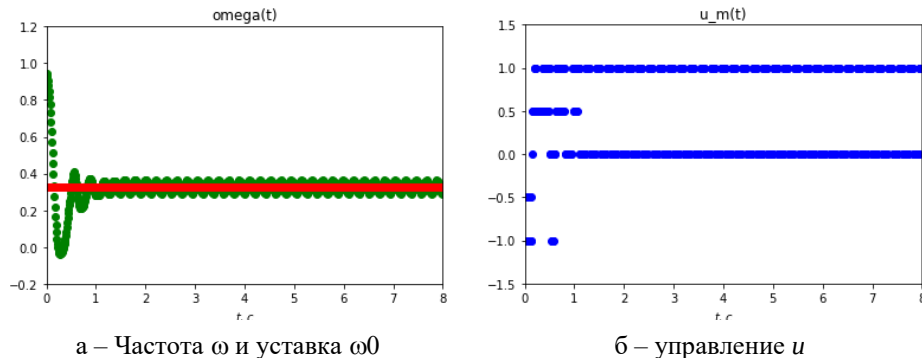


Рис. 5. Переходные процессы при $u \in \{-u_{\max}, -u_{\max}/2, 0, +u_{\max}/2, +u_{\max}\}$ и дискретизации 30×30 ячеек $\gamma=1$ и вознаграждении (15)

Теперь рассмотрим инкрементальный способ введения управления, при котором вычисляется не абсолютное значение управления, а его приращение. Будем рассматривать множество возможных управлений, включающих 3 действия: оставить управление прежним, увеличить управление на величину du , уменьшить управление на величину $-du$.

Результаты моделирования показывают, что в данном случае СКО ошибки управления составляет порядка 0,18. Большая ошибка обусловлена тем, что для данного способа формирования управления требуется строить функцию ценности действий в пространстве (ω, ω_0, u) , т.е. учитывать текущее значение управляющего воздействия.

IV. Методика разработки интеллектуальной системы управления на основе Q-метода обучения с подкреплением. На основе проведенных исследований предлагается следующая методика.

1. Исходными данными являются диапазон изменения частот вращения $[\omega_{min}, \omega_{max}]$, диапазон изменения входных воздействий $[\underline{u}_{min}, u_{max}]$, требуемая точность поддержания частоты вращения $e\omega$. Номер итерации устанавливается $Nit=1$.

2. Непрерывное пространство ω, ω_0 разбивается на ячейки, число которых определяется выражением

$$N_c = \left\lceil \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{e\omega} \right\rceil, \quad (16)$$

где $\lceil * \rceil$ – операция округления к ближайшему сверху целому числу.

3. Выбирается множество управлений $u \in \{-u_{max}, 0, +u_{max}\}$.

4. Осуществляется обучение Q-методом 3 алгоритма управления 14 при $\gamma 1$ и $\alpha \in (0, 0.1]$, при вознаграждении 15.

5. Проводится исследование точности замкнутой системы.

6. Если полученное СКО меньше или равно величины $e\omega$, то процесс завершается переход на п. 10.

7. Если полученное СКО больше величины $e\omega$, то в множество управлений u осуществляется введение дополнительных управлений величиной $u_{max}/(2Nit)$.

8. Повторяются пункты 4, 5, 6.

9. Если полученное СКО все еще больше величины $e\omega$, то увеличивается число ячеек, на которые разбивается пространство ω, ω_0 и повторяются пункты 4, 5, 6.

10. Конец процедуры.

Рассмотренная методика позволяет обеспечить требуемую точность поддержания заданной частоты вращения двигателя, однако существуют колебательные движения в малой окрестности желаемой частоты из-за релейного характера управления. Устранение колебаний требует решения задачи в классе непрерывных управлений, что, как указывалось выше требует непрерывной аппроксимации функций ценности управляющих воздействий. Как правило, такая задача требует применения нейронных сетей в качестве аппроксиматоров функций ценности.

Необходимость использования интеллектуальных методов аппроксимации функций ценности в описываемой задаче обусловлена сложностью этих функций. Для примера, на рис. 6 представлен функция ценности действия $u=-u_{max}$.

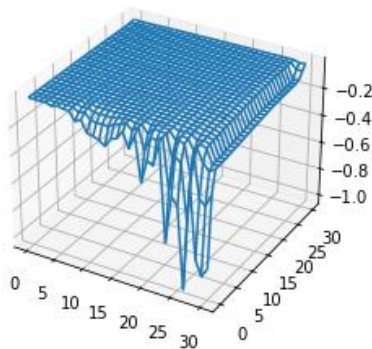


Рис. 6. Вид функции ценности $Q(\omega, \omega_0, u)$ при $u=-u_{max}$

На рис. 6 функция ценности приведена к диапазону $[0, 1]$. Для функций ценности в решаемой задаче характерны высокая нелинейность и большой диапазон значений, что обуславливает необходимость применения нейросетевых аппроксиматоров. В табл. 5 представлены результаты сравнения полиномиальной и нейросетевой аппроксимации функции ценности. Полиномиальная аппроксимация выполнена для порядка полинома $n = 3$. Нейро-

сетевая аппроксимация выполнена трехслойной статической полносвязной нейронной сетью прямого распространения с числом нейронов 40, 40 и 1. Функции активации первого и второго слоев сигмоидальные, а функция активации выходного слоя – линейная. Из табл. 5 следует, что погрешность нейросетевой аппроксимации функции ценности действий почти на порядок меньше, чем погрешность полиномиальной аппроксимации.

Таблица 5

СКО при полиномиальной и нейросетевой аппроксимации

Метод аппроксимации	Полиномиальный	Нейросетевой
Ошибка	0.18	0.02

Обсуждение результатов и заключение. В работе исследован процесс формирования управления методом Q-обучения с подкреплением для динамического устойчивого объекта с одним входом и одним выходом. В качестве объекта рассмотрен двигатель постоянного тока с независимым возбуждением.

Получено доказательство сходимости процесса обучения и оценка шага обучения. Данная оценка является грубой и завышает допустимый шаг обучения α , что связано с двумя факторами. Первый из них заключается в том, что в приведенном доказательстве не учтена дискретизация пространства состояния по переменным ω, ω_0 . Второй фактор – предположение о том, что шаг дискретизации по времени бесконечно мал. Влияние последнего предположения всегда можно снизить, выбрав достаточно малый шаг дискретизации по времени. Первой предположение требует рассмотрения гибридной дискретно-непрерывной системы.

Однако, принципиальным ограничением предложенного метода является необходимость наличия модели на этапе обучения алгоритма управления. Такая модель должна позволять обучать алгоритм управления во всех возможных режимах, при всех возможных параметрах и возмущениях. Вместе с тем, известно, что обучение на синтетических данных не позволяет достичь высокой точности, поэтому требуется проведение дообучения на реальном объекте. Очевидно, неустойчивость какого-либо состояния объекта управления будет при этом проблемой.

К достоинствам предложенного метода управления относится его простота и возможность автоматической настройки для объекта с высокой степенью неопределенности параметров и внешних возмущений. При этом настройки осуществляется до начала функционирования замкнутой системы и может занимать до нескольких минут. Аналогичный подход используется в ряде приводов Siemens для настройки ПИД-регуляторов [30].

Основным недостатком предложенного метода является то, что на выходе системы присутствуют неустраняемые колебания, то не всегда допустимо с точки зрения управляемого технологического процесса. Для устранения данного недостатка необходимо переходить к постановке задачи с непрерывным управлением. В свою очередь, такая постановка задачи требует аппроксимации функций ценности и соответственно применения нейросетевых аппроксиматоров.

Для придания свойств адаптивности в динамике необходимо проводить обучение в пространстве состояний, включающем ток и текущее значение управляющего воздействия ω, ω_0, I, u). В этом случае можно обеспечить адаптацию к неизвестным изменяющимся в ходе функционирования объекта параметрам и внешним возмущениям.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00063, «Теоретические основы и методы группового управления безэкипажными подводными аппаратами», <https://rscf.ru/project/24-19-00063/> на базе ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фаворская М.Н., Пахирка А.И. Восстановление аэрофотоснимков сверхвысокого разрешения с учетом семантических особенностей // Информатика и автоматизация. – 2024. – Т. 23 (4). – С. 1047-1076. – DOI: 10.15622/ia.23.4.5.

2. Голубинский А.Н., Толстых А.А., Толстых М.Ю. Автоматическая генерация аннотаций научных статей на основе больших языковых моделей // Информатика и автоматизация. – 2025. – Т. 24 (1). – С. 275-301. – <https://doi.org/10.15622/ia.24.1.10>.
3. Zhang D., He R., Liao X., Li F., Chen J. and Yang G. Face Forgery Detection Based on Fine-Grained Clues and Noise Inconsistency // IEEE Transactions on Artificial Intelligence. – 2025. – Vol. 6 (1). – P. 144-158. – DOI: 10.1109/TAI.2024.3455311.
4. Sobo A., Mubarak A., Baimagambetov A., Polatidis N. Evaluating LLMs for Code Generation in HRI: A Comparative Study of ChatGPT, Gemini, and Claude // Applied Artificial Intelligence. – 2024. – Vol. 39 (1). – <https://doi.org/10.1080/08839514.2024.2439610>.
5. Чен Х., Игнатъева С.А., Бозуш Р.П., Абламейко С.В. Повторная идентификация людей в системах видеонаблюдения с использованием глубокого обучения: анализ существующих методов // Автоматика и телемеханика. – 2023. – № 5. – С. 61-112. – DOI: 10.31857/S0005231023050057
6. Понимаши З.А., Потанин М.В. Метод и алгоритм извлечения признаков из цифровых сигналов на базе нейросетей трансформер // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 6. – С. 52-64. – DOI: 10.18522/2311-3103-2024-6-52-64.
7. Hamdan N., Medvedev M., Pshikhopov V. Method of Motion Path Planning Based on a Deep Neural Network with Vector Input // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. – 2024. – Vol. 25(11). – P. 559-567. – <https://doi.org/10.17587/mau.25.559-567>.
8. Gaiduk A.R., Martjanov O.V., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., Hamdan N., Farhood A. Neural network based control system for robots group operating in 2-d uncertain environment // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. – 2020. – Vol. 21 (8). – P. 470-479. – <https://doi.org/10.17587/mau.21.470-479>.
9. Самтон Р.С., Барто Э.Дж. Обучение с подкреплением: Введение. – 2-е изд.: пер. с англ. А.А. Слинкина. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 552 с.
10. Lei X., Zhang Z., Dong P. Dynamic Path Planning of Unknown Environment Based on Deep Reinforcement Learning // Journal of Robotics. – V. 2018, Article ID 5781591. – 10 p. – <https://doi.org/10.1155/2018/5781591>.
11. Wang B., Liu Z., Li Q., Prorok A. Mobile Robot Path Planning in Dynamic Environments Through Globally Guided Reinforcement Learning // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2020. – Vol. 5 (4). – P. 6932-6939. – DOI: 10.1109/LRA.2020.3026638.
12. Srikonda S., Norris W.R., Nottage D., Soylemezoglu A. Deep Reinforcement Learning for Autonomous Dynamic Skid Steer Vehicle Trajectory Tracking // Robotics. – 2022. – Vol. 11 (95). – <https://doi.org/10.3390/robotics11050095>.
13. Van Hasselt H., Guez A., Silver D. Deep Reinforcement Learning with Double Q-Learning[C] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2016. – 30 (1).
14. Lv L.H., Zhang S.J., Ding D.R., Wang Y.X. Path Planning via an Improved DQN-Based Learning Policy // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 67319-67330.
15. Ramaswamy A. and Hüllermeier E. Deep Q-Learning: Theoretical Insights From an Asymptotic Analysis // IEEE Transactions on Artificial Intelligence. – 2022. – Vol. 3 (2). – P. 139-151. – DOI: 10.1109/TAI.2021.3111142
16. Lillicrap T.P., Hunt J.J., Pritzel A., Heess N., Erez T., Tassa Y., Silver D., Wierstra D. Continuous control with deep reinforcement learning // arXiv:1509.02971. – 2015.
17. Fujimoto S., Hoof H.V., Meger D. Addressing Function Approximation Error in Actor-Critic Methods // ArXiv. – 2018. – abs/1802.09477.
18. Ханкин Д.Л., Феофилов С.В. Синтез устойчивых нейросетевых регуляторов для объектов с ограничителями в условиях неполной информации // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2024. – Т. 25 (7). – С. 345-353. – <https://doi.org/10.17587/mau.25.345-353>.
19. Gupta M., Jin L., Homma N. Static and Dynamic Neural Networks: From Fundamentals to Advanced Theory. – John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2003.
20. Жилов Р.А. Постройка ПИД-регулятора с использованием нейронных сетей // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2022. – № 5 109. – С. 38-47. – DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-38-47.
21. Nguyet T.M., Dang X.B. A neural flexible PID controller for task-space control of robotic manipulators // Frontiers in Robotics and AI. – 2023. – Vol. 9. – P. 1-10. – DOI:10.3389/frobt.2022.975850.
22. Mnih V., Kavukcuoglu K., Silver D. et al. Human-level control through deep reinforcement learning // Nature. – 2015. – No. 518 (7540). – P. 529-533.
23. Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю. Блочный синтез робастных систем при ограничениях на управления и координаты состояния // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2011. – № 1. – С. 2-8.
24. Pshikhopov V., Medvedev M. Multi-Loop Adaptive Control of Mobile Objects in Solving Trajectory Tracking Tasks // Automation and Remote Control. – 2020. – Vol. 81 (11). – P. 2078-2093.
25. – <https://doi.org/10.1134/S0005117920110090>.

26. Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю., Шевченко В.А. Адаптивное управление с эталонной моделью приводом постоянного тока // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 2 (163). – С. 6-18.
27. Еремеев А.П., Сергеев М.Д., Петров В.С. Интеграция методов обучения с подкреплением и нечеткой логики для интеллектуальных систем реального времени // Программные продукты и системы. – 2023. – Т. 36 (4). – С. 600-606. – DOI: 10.15827/0236-235X.142.600-606.
28. Takuya Okano, Masaki Onishi. A Parameter Investigation of the ϵ -greedy Exploration Ratio Adaptation Method in Multi-agent Reinforcement Learning // European Workshop on Reinforcement Learning. – 2018. – Vol. 14.
29. Shah Asif Bashir¹, Farida Khursheed, Ibrahim Abdoulahi. Adaptive ϵ -Greedy Exploration for Finite Systems // Gedrag & Organisatie Review. – 2021. – Vol. 34 (04). – DOI: 10.37896/GOR34.04/044.
30. Van Hasselt H. Double Q-learning // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2011. – Vol. 23. – P. 2613-2622.
31. Бергер Г. Автоматизация посредством STEP 7 с использованием STL и SCL программируемых контроллеров SIMATIC S7-300/400. – Siemens AG, Нюрнберг, 2001.

REFERENCES

1. Favorskaya M.N., Pakhira A.I. Vosstanovlenie aerofotosnimkov sverkhvysokogo razresheniya s uchetom semanticheskikh osobennostey [Restoration of ultra-high-resolution aerial photographs taking into account semantic features], *Informatika i avtomatizatsiya* [Computer Science and Automation], 2024, Vol. 23 (4), pp. 1047-1076. DOI: 10.15622/ia.23.4.5.
2. Golubinskiy A.N., Tolstykh A.A., Tolstykh M.Yu. Avtomaticheskaya generatsiya annotatsiy nauchnykh statey na osnove bol'shikh yazykovykh modeley [Automatic generation of abstracts of scientific articles based on large language models], *Informatika i avtomatizatsiya* [Computer Science and Automation], 2025, Vol. 24 (1), pp. 275-301. Available at: <https://doi.org/10.15622/ia.24.1.10>.
3. Zhang D., He R., Liao X., Li F., Chen J. and Yang G. Face Forgery Detection Based on Fine-Grained Clues and Noise Inconsistency, *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, 2025, Vol. 6 (1), pp. 144-158. DOI: 10.1109/TAI.2024.3455311.
4. Sobo A., Mubarak A., Baimagambetov A., Polatidis N. Evaluating LLMs for Code Generation in HRI: A Comparative Study of ChatGPT, Gemini, and Claude, *Applied Artificial Intelligence*, 2024, Vol. 39 (1). Available at: <https://doi.org/10.1080/08839514.2024.2439610>.
5. Chen Kh., Ignat'eva S.A., Bogush R.P., Ablameyko S.V. Povtornaya identifikatsiya lyudey v sistemakh videonablyudeniya s ispol'zovaniem glubokogo obucheniya: analiz sushchestvuyushchikh metodov [People re-identification in video surveillance systems using deep learning: analysis of existing methods], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemetry], 2023, No. 5, pp. 61-112. DOI: 10.31857/S0005231023050057
6. Ponimash Z.A., Potanin M.V. Metod i algoritm izvlecheniya priznakov iz tsifrovyykh signalov na baze neyrosetey transformer [Method and algorithm for extracting features from digital signals based on transformer neural networks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 6, pp. 52-64. DOI: 10.18522/2311-3103-2024-6-52-64.
7. Hamdan N., Medvedev M., Pshikhopov V. Method of Motion Path Planning Based on a Deep Neural Network with Vector Input, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2024, Vol. 25(11), pp. 559-567. Available at: <https://doi.org/10.17587/mau.25.559-567>.
8. Gaiduk A.R., Martjanov O.V., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., Hamdan N., Farhood A. Neural network based control system for robots group operating in 2-d uncertain environment, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, Vol. 21 (8), pp. 470-479. Available at: <https://doi.org/10.17587/mau.21.470-479>.
9. Sutton R.S., Barto E.Dzh. Obuchenie s podkrepleniem: Vvedenie [Reinforcement learning: Introduction]. 2nd ed.: transl. from Engl. A.A. Slinkina. Moscow: DMC Press, 2020, 552 p.
10. Lei X., Zhang Z., Dong P. Dynamic Path Planning of Unknown Environment Based on Deep Reinforcement Learning, *Journal of Robotics*, V. 2018, Article ID 5781591, 10 p. Available at: <https://doi.org/10.1155/2018/5781591>.
11. Wang B., Liu Z., Li Q., Prorok A. Mobile Robot Path Planning in Dynamic Environments Through Globally Guided Reinforcement Learning, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, Vol. 5 (4), pp. 6932-6939. DOI: 10.1109/LRA.2020.3026638.
12. Srikonda S., Norris W.R., Nottage D., Soylemezoglu A. Deep Reinforcement Learning for Autonomous Dynamic Skid Steer Vehicle Trajectory Tracking, *Robotics*, 2022, Vol. 11 (95). Available at: <https://doi.org/10.3390/robotics11050095>.
13. Van Hasselt H., Guez A. Silver D. Deep Reinforcement Learning with Double Q-Learning[C], *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2016, 30 (1).

14. Lv L.H., Zhang S.J., Ding D.R., Wang Y.X. Path Planning via an Improved DQN-Based Learning Policy, *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 67319-67330.
15. Ramaswamy A. and Hüllermeier E. Deep Q-Learning: Theoretical Insights From an Asymptotic Analysis, *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, 2022, Vol. 3 (2), pp. 139-151. DOI: 10.1109/TAI.2021.3111142.
16. Lillicrap T.P., Hunt J.J., Pritzel A., Heess N., Erez T., Tassa Y., Silver D., Wierstra D. Continuous control with deep reinforcement learning, *arXiv:1509.02971*, 2015.
17. Fujimoto S., Hoof H.V., Meger D. Addressing Function Approximation Error in Actor-Critic Methods, *ArXiv*, 2018. abs/1802.09477.
18. Khapkin D.L., Feofilov S.V. Sintez ustoychivyykh neyrosetevykh regulyatorov dlya ob"ektov s ograniчениymi v usloviyakh nepolnoy informatsii [Synthesis of stable neural network controllers for objects with constraints under incomplete information], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2024, Vol. 25 (7), pp. 345-353. Available at: <https://doi.org/10.17587/mau.25.345-353>.
19. Gupta M., Jin L., Homma N. Static and Dynamic Neural Networks: From Fundamentals to Advanced Theory. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2003.
20. Zhilov R.A. Postroyka PID-regulyatora s ispol'zovaniem neyronnykh setey [Construction of a PID controller using neural networks], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the RAS], 2022, No. 5 (109), pp. 38-47. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-38-47.
21. Nguyen T.M., Dang X.B. A neural flexible PID controller for task-space control of robotic manipulators, *Frontiers in Robotics and AI*, 2023, Vol. 9. – P. 1-10. DOI=10.3389/frobt.2022.975850.
22. Mnih V., Kavukcuoglu K., Silver D. et al. Human-level control through deep reinforcement learning, *Nature*, 2015, No. 518 (7540), pp. 529-533.
23. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Blochnyy sintez robustnykh sistem pri ograniчениyakh na upravleniya i koordinaty sostoyaniya [Block synthesis of robust systems with constraints on controls and state coordinates], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2011, No. 1, pp. 2-8.
24. Pshikhopov V., Medvedev M. Multi-Loop Adaptive Control of Mobile Objects in Solving Trajectory Tracking Tasks, *Automation and Remote Control*, 2020, Vol. 81 (11), pp. 2078-2093. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0005117920110090>.
25. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Shevchenko V.A. Adaptivnoe upravlenie s etalonnoy model'yu privodom postoyannogo toka [Adaptive control with a reference model of a DC drive], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 2 (163), pp. 6-18.
26. Ereemeev A.P., Sergeev M.D., Petrov V.S. Integratsiya metodov obucheniya s podkrepleniem i nechetkoy logiki dlya intellektual'nykh sistem real'nogo vremeni [Integration of reinforcement learning methods and fuzzy logic for intelligent real-time systems], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2023, Vol. 36 (4), pp. 600-606. DOI: 10.15827/0236-235X.142.600-606.
27. Takuya Okano, Masaki Onishi. A Parameter Investigation of the ϵ -greedy Exploration Ratio Adaptation Method in Multi-agent Reinforcement Learning, *European Workshop on Reinforcement Learning*, 2018, Vol. 14.
28. Shah Asif Bashir1, Farida Khursheed, Ibrahim Abdoula. Adaptive ϵ -Greedy Exploration for Finite Systems, *Gedrag & Organisatie Renew*, 2021, Vol. 34 (04). DOI: 10.37896/GOR34.04/044.
29. Van Hasselt H. Double Q-learning, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2011, Vol. 23, pp. 2613-2622.
30. Berger G. Avtomatizatsiya posredstvom STEP 7 s ispol'zovaniem STL i SCL programmiruemykh kontrollerov SIMATIC S7-300/400 [Automation with STEP 7 using STL and SCL of SIMATIC S7-300/400 programmable controllers]. Siemens AG, Nyurnberg, 2001.

Карапеев Александр Николаевич – ООО «Миртек»; e-mail: a.karapeev@mirtekgroup.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 79185564919; зам. директора по общим вопросам.

Косенко Евгений Юрьевич – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: ekosenko@sfned.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; к.т.н.; с.н.с.

Медведев Михаил Юрьевич – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: medvmihal@sfned.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; д.т.н.; в.н.с.

Пшихопов Вячеслав Хасанович – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: pshichop@rambler.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; д.т.н.; профессор; директор.

Karapeev Alexander Nikolaevich – Mirtek LLC; e-mail: a.karapeev@mirtekgroup.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185564919; Deputy Director.

Kosenko Evgeniy Косенко Yurjevich – R&D Institute of Robotics and Control Systems; e-mail: ekosenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Medvedev Mikhail Yurjevich – R&D Institute of Robotics and Control Systems; e-mail: medvmihal@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694; dr. of eng. sc.; leading researcher.

Pshikhopov Viacheslav Khasanovich – R&D Institute of Robotics and Control Systems; e-mail: pshichop@rambler.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694; dr. of eng. sc.; professor; director.

УДК 007.52

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-175-185

Л.А. Рыбак, Д.И. Малышев, Д.А. Дьяконов, А.А. Мамченкова

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ПРИ НАЛИЧИИ СТАЦИОНАРНЫХ И ПОДВИЖНЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ

Рассматривается метод планирования траектории движения группы мобильных роботов, обеспечивающий безопасное перемещение и исключающий возможность столкновений как между самими роботами, так и с внешними препятствиями, включая движущиеся объекты. Разработанная математическая модель учитывает три основных сценария возможных столкновений: пересечение траекторий роботов внутри группы, взаимодействие со стационарными препятствиями и вероятность столкновения с подвижными объектами. Каждый из этих сценариев детально анализируется для обеспечения максимальной безопасности движения, а их учет позволяет эффективно адаптировать маршруты роботов к изменяющимся условиям среды. Траектория движения каждого робота представляется в виде ломаной линии с промежуточными точками, которые оптимизируются для обеспечения безопасности движения. Особое внимание уделяется адаптации скорости на различных участках траектории: робот может изменять скорость в зависимости от текущих условий, чтобы минимизировать риск столкновений. Для оценки расстояний между объектами используется евклидова норма, позволяющая рассчитывать минимальные расстояния между центрами сферических представлений роботов и препятствий. Задача решается в два этапа. На первом этапе строится траектория для первого робота с учетом начальных условий и расположения препятствий. На втором этапе формируются траектории для остальных роботов с учетом уже спланированных маршрутов. Для оптимизации координат промежуточных точек и скоростей применяется генетический алгоритм, который минимизирует время перемещения и обеспечивает безопасность движения. Генетический алгоритм использует операторы скрещивания и мутации для создания разнообразных решений, а также выполняет проверку на соответствие условиям безопасности. Численное моделирование проведено на языке Python с использованием библиотеки Matplotlib для визуализации результатов. В ходе экспериментов было выполнено 50 тестов с различным количеством препятствий (от 5 до 10). Анализ результатов показал, что с увеличением числа препятствий возрастает как время расчета, так и качество сформированных траекторий. Это подтверждает эффективность предложенного метода для управления группами мобильных роботов в динамически меняющейся среде.

Группа роботов; мобильный робот; планирование траектории; препятствие; генетический алгоритм; модель.

L.A. Rybak, D.I. Malyshev, D.A. Dyakonov, A.A. Mamchenkova

A GENETIC ALGORITHM FOR PLANNING THE TRAJECTORY OF A GROUP OF MOBILE ROBOTS IN THE PRESENCE OF STATIONARY AND MOBILE OBSTACLES

The article discusses a trajectory planning method for a group of mobile robots that ensures safe movement and eliminates the possibility of collisions both between the robots themselves and with external obstacles, including moving objects. The developed mathematical model considers three main collision scenarios: intersection of robot trajectories within the group, interaction with stationary obstacles, and

the probability of collision with moving objects. Each of these scenarios is analyzed in detail to ensure maximum safety during movement, and their consideration allows for efficient adaptation of robot routes to changing environmental conditions. The trajectory of each robot is represented as a piecewise linear path with intermediate points, which are optimized to ensure safe movement. Special attention is paid to speed adaptation on different segments of the trajectory: a robot can adjust its speed based on current conditions to minimize the risk of collisions. To evaluate distances between objects, the Euclidean norm is used, allowing for the calculation of minimum distances between the centers of spherical representations of robots and obstacles. The problem is solved in two stages. In the first stage, a trajectory is constructed for the first robot, taking into account initial conditions and obstacle placement. In the second stage, trajectories are formed for the remaining robots, considering the already planned routes. For optimizing the coordinates of intermediate points and speeds, a genetic algorithm is applied, which minimizes travel time while ensuring safe movement. The genetic algorithm uses crossover and mutation operators to generate diverse solutions and performs checks to ensure compliance with safety conditions. Numerical simulations were conducted using Python, with the Matplotlib library used for visualization of results. During the experiments, 50 tests were performed with varying numbers of obstacles (from 5 to 10). Analysis of the results showed that as the number of obstacles increased, both the computation time and the quality of the generated trajectories improved. This confirms the effectiveness of the proposed method for controlling groups of mobile robots in dynamically changing environments.

Group of robots; mobile robot; trajectory planning; obstacle; genetic algorithm; model.

Введение. Формирование траектории для групп мобильных роботов позволяет обеспечить безопасность, эффективность и координацию действий. Корректное формирование траектории исключает возможные столкновения с препятствиями статическими и подвижными, защищая автономных роботов и продлевая срок службы. В работах [1–5] исследуются подходы к оценке риска столкновений или предлагаются алгоритмы их предотвращения. Координация между роботами включает учет их взаимного расположения и разделение зон ответственности, что исключает столкновения между агентами группы и повышает продуктивность совместной работы. Такой подход гарантирует оптимальное использование энергии и времени, а также обеспечивает плавные движения и адаптивность системы. Подобные решения обсуждаются в статьях [6–9], где рассматриваются, в частности, гибридные методы планирования траектории для группы роботов. В исследованиях [10–16] анализируются методы и алгоритмы управления движением мобильных роботов. В то же время, в работах [17–22] предлагаются улучшенные или инновационные подходы к оптимизации данных процессов, основанные на существующих методологиях.

В статье рассмотрен метод формирования траектории, который использует генетический алгоритм для создания промежуточных точек траектории. Генетический алгоритм генерирует множество возможных решений, оценивает их на предмет безопасности и оптимальности, а затем применяет операторы скрещивания и мутации для улучшения результатов. Это позволяет находить безопасные и эффективные маршруты для каждого робота в группе. Метод обладает высокой степенью масштабируемости и применим в различных сферах: доставка и городская логистика, сельское хозяйство, строительство, экология, обеспечивая надежность и производительность работы роботов.

Математическая модель движения группы роботов. Рассмотрим метод формирования траектории, обеспечивающий исключение как взаимных столкновений между роботами внутри группы, так и их столкновений с внешними препятствиями различной природы. В ходе анализа были выявлены три основных сценария возникновения столкновений. Первый сценарий характеризуется пересечением траекторий перемещения роботов, что становится вероятным вследствие их компактного расположения в пространстве на относительно небольших расстояниях друг от друга. Второй сценарий описывает ситуацию столкновения роботов с фиксированными стационарными препятствиями, присутствующими в рабочей области. Третий сценарий учитывает вероятность столкновения с подвижными объектами, движущимися в той же операционной среде. Указанные сценарии представлены визуально на рис. 1.

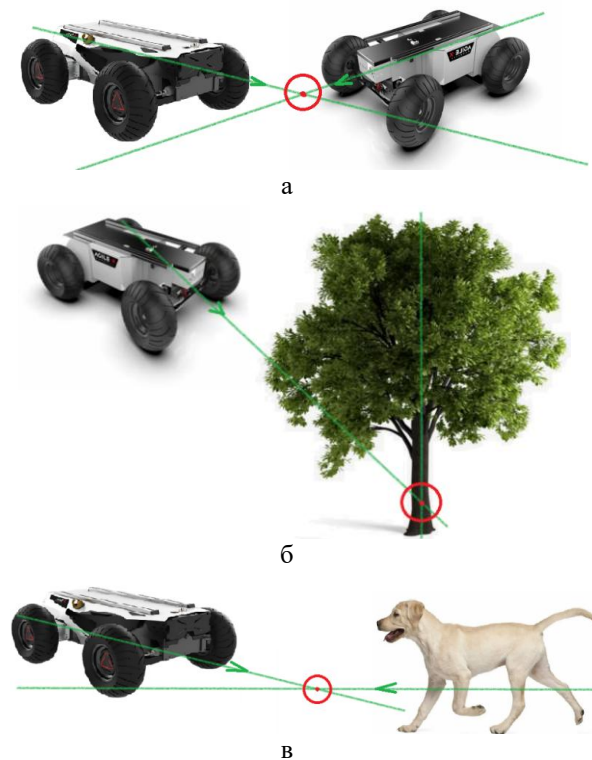


Рис. 1. Визуальные схемы сценариев: а – столкновение роботов в группе, б – столкновение робота со стационарным препятствием, в – столкновение робота с подвижным препятствием

Перемещение группы роботов осуществляется из заданных начальных координат в конечные координаты. При этом траектория движения каждого робота может быть представлена в виде ломаной линии рис. 2, содержащей определённое количество промежуточных точек. Такая структура траектории используется для обеспечения безопасного перемещения, особенно в условиях наличия движущихся препятствий.

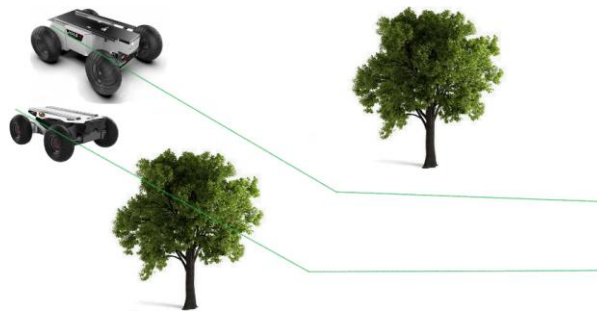


Рис. 2. Пример сформированной траектории

В задаче предполагается, что препятствия движутся с известными скоростями и имеют заранее определённые траектории перемещения. Цель состоит в том, чтобы спроектировать траектории для роботов таким образом, чтобы исключить любые возможные столкновения как с движущимися препятствиями, так и между самими роботами. Для

этого метод учитывает взаимное расположение объектов на протяжении всего процесса перемещения. Для оценки расстояния между роботами и препятствиями используется упрощённая модель, где каждый объект представляется в виде сферы. Центр сферы соответствует текущей позиции объекта, а радиус выбирается таким образом, чтобы гарантировать безопасную дистанцию. Расчёт расстояния выполняется с помощью Евклидовой нормы, которая определяет минимальное расстояние между центрами этих сфер.

При прохождении различных участков своей траектории робот может изменять скорость движения. На некоторых отрезках траектории робот может достигать максимальной скорости, тогда как на других – снижать её для минимизации риска столкновения с препятствиями или другими роботами. Такая адаптация скорости позволяет эффективно использовать доступное время и пространство, одновременно обеспечивая безопасность перемещения.

Расстояние рассматривается как вектор, например, $\overrightarrow{AB}$ с начальной $A(x_A, y_A, z_A)$ и конечной $B(x_B, y_B, z_B)$ точками и Евклидова норма будет вычисляться по следующей формуле:

$$d(A, B) = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}. \quad (1)$$

Критерием оценки является время достижения группы роботов конечной точки его траектории, которое вычисляется по следующей формуле:

$$T_{max} = \max_i T^{(i)}, \quad (2)$$

где T_{max} – максимальное значение времени достижения конечной точки траектории роботом i , i – номер робота в группе, которое $i \in 1, \dots, N_r$, $T^{(i)}$ – время достижения конечной точки каждого робота в группе, которое вычисляется по формуле

$$T^{(i)} = \sum_{j=1}^N t_j^{(i)}, \quad (3)$$

где j – количество временных промежутков, $j \in 1 \dots t_N$, N – количество всех вершин траектории, включая начальную и конечную, $t_j^{(i)}$ – время перемещения робота на каждом отрезке траектории, который вычисляется по следующей формуле:

$$t_j^{(i)} = \frac{d(P_j^{(i)}, P_{j+1}^{(i)})}{v_{r_j}^{(i)}}, \quad (4)$$

где $P_j^{(i)}$ – координаты вершин отрезков траектории, $v_{r_j}^{(i)}$ – скорости робота на каждом отрезке, $d(P_j^{(i)}, P_{j+1}^{(i)})$ – расстояние между вершинами траектории, применяя 1.

Рассчитав все временные промежутки перемещений робота по вершинам траектории, выполняется расчет координат, в которых робот будет находиться в каждый промежуток времени t . Такие координаты вычисляются по формуле 5, но если значение $T^{(i)}$ для i робота является итоговым, но остальные роботы в группе продолжают свое перемещение, то робот будет находиться в конечном положении траектории до достижения времени T_{max} .

$$P^{(i)} = \begin{cases} P_N^{(i)}, & \text{если } T_{max} > T^{(i)} \\ P_j^{(i)} + \frac{(P_{j+1}^{(i)} - P_j^{(i)}) * (t_n - t_j^{(i)})}{(t_{j+1}^{(i)} - t_j^{(i)})}, & \text{иначе} \end{cases} \quad (5)$$

где $P^{(i)}$ – координаты перемещения робота на отрезках траектории, вычисляемые относительно шага, $P_{j+1}^{(i)}$ – координаты, в которые переместится робот, $P_j^{(i)}$ – координаты, в которых находится робот, $t_{j+1}^{(i)}$, $t_j^{(i)}$ – время, вычисляемое по формуле 3, $P_N^{(i)}$ – конечная вершина траектории АТС, t_n – время перемещения в каждую точку на траектории, относительно шага Δt , которое вычисляется

$$t_n = n * \Delta t \quad (6)$$

где Δt – шаг, с которым робот перемещается по траектории, $n \in 1 \dots t_j^{(i)}$.

Расчет положений препятствий относительно времени перемещения роботов на каждом промежутке времени выполняется по следующей формуле:

$$C^{(s)} = C_1^{(s)} + \vec{v}_s^{(s)} * t_n, \quad (7)$$

где $C^{(s)}$ – новые положения препятствий в промежутки времени перемещений робота, $C_1^{(s)}$ – начальное положение препятствий, $\vec{v}_s^{(s)}$ – скорость препятствий, s – количество препятствий, $s \in 1, \dots, N_s$.

Рассчитав все координаты для перемещения роботов по траекториям с заданным шагом и времени каждого перемещения, а также все положения препятствий, выполняется проверка на наличие столкновения группы роботов между собой или с препятствием.

$$d(P^{(i)}, C^{(i)}) > r_s^{(i)} + r^{(i)}, \quad (8)$$

где $d(P^{(i)}, C^{(i)})$ – расстояние между координатами положений робота $P^{(i)}$ и препятствия $C^{(i)}$, применяя 1, $r_s^{(i)}$ – радиус препятствия, $r^{(i)}$ – радиус робота.

$$d(P^{(i)}, P^{(k)}) > r^{(i)} + r^{(k)}, \quad (9)$$

где $d(P^{(i)}, P^{(k)})$ – расстояние между центрами робота и препятствия, применяя 1, r – радиус робота, k – количество остальных роботов в группе, $k \in 1 \dots N_r$.

Если условия 8 и 9 выполняются, то перемещение робота по траектории выполняется, и такая траектория считается оптимальной, иначе выполняется новое формирование промежуточных точек.

Для второго этапа выполняется вычисление начальных и конечных значений вершин траектории для каждого робота в группе, за исключением первого робота, которые вычисляются

$$P_f^{(m)} = P_f^{(1)} + \begin{cases} C_t - 2, & \text{если } C_t \leq 0 \\ C_t + 2, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (10)$$

где C_t – критерий, значение которого случайно выбирается $[-5, 5]$, f – индекс параметра, равный 1 и N , m – количество АТС в группе, за исключением первого.

Диапазон значений промежуточных вершин для траектории и скоростей на отрезках траектории каждого робота в группе вычисляется по следующим формулам:

$$D_p^{(i)} = (P_j^{(i)} - 2 * r + 1, P_j^{(i)} + 2 * r + 1), \quad (11)$$

где $D_p^{(i)}$ – диапазон для формирования промежуточных вершин траекторий АТС на втором этапе.

$$D_v^{(i)} = (v_{r_j}^{(i)} - 1, v_{r_j}^{(i)} + 1), \quad (12)$$

где $D_v^{(i)}$ – диапазон для формирования скоростей АТС на отрезках траекторий второго этапа.

Задача планирования траекторий для группы мобильных роботов решается в два этапа. На первом этапе строится траектория для первого робота. Здесь оптимизируются координаты промежуточных вершин траектории $P_j^{(1)}$ для $j \in 2, \dots, N - 1$ внутри заданного диапазона D_p , при этом начальная $P_1^{(1)}$ и конечная $P_N^{(1)}$ вершины известны из исходных данных. Также оптимизируются скорости $v_{r_j}^{(1)}$ на каждом из N участков траектории в пределах допустимого диапазона D_v . Целью является минимизация времени достижения конечной точки T_{max} , при этом необходимо учесть ограничения: избежать столкновений с препятствиями, координаты которых $C_1^{(s)}$ генерируются в заданном диапазоне D_C , а их скорости определяются стохастически в диапазоне $D_{\vec{v}}$ включая возможность нулевой скорости.

На втором этапе последовательно строятся траектории для остальных роботов ($i \in 1, \dots, N_r$). Для каждого робота задача аналогична первой: оптимизируются координаты промежуточных вершин $P_j^{(i)}$ и скорости $v_{r_j}^{(i)}$, минимизируется время T_{max} . Однако

теперь начальные $P_1^{(1)}$ и конечные $P_N^{(1)}$ вершины рассчитываются по уравнениям 10 исходя из траектории первого робота. Ограничения становятся более сложными - нужно не только избегать препятствия, но и учитывать уже спланированные траектории других роботов, чтобы избежать между ними столкновений.

Описание структуры метода. Метод планирования траектории движения группы роботов представлен на рис. 3. Блок-схема генетического алгоритма, который формирует промежуточные точки для траектории движения робота, представлен на рис. 4. Метод планирования траектории включает два основных этапа:

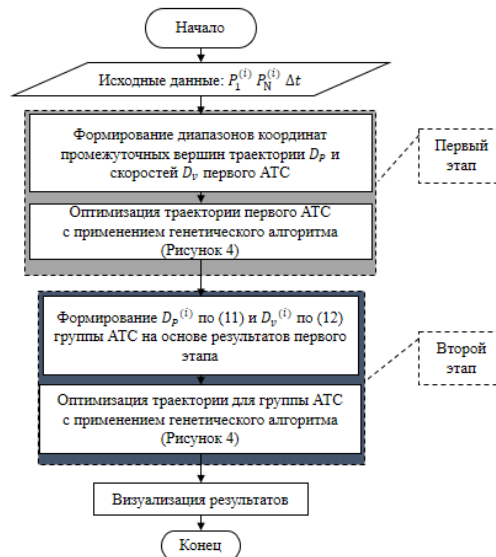


Рис. 3. Блок-схема метода планирования траектории для группы мобильных роботов

На первом этапе выполняется планирование траектории для первого робота в группе. Этот процесс начинается с анализа начальных условий, таких как координаты старта P_1 , цели P_N и расположение препятствий. Для генерации возможных траекторий применяется генетический алгоритм, используя диапазоны промежуточных вершин D_p и скоростей D_v . Сгенерировав промежуточные вершины траектории, выполняется расчет времени перемещения по траектории по формуле 3. Вычислив время перемещения робота по траектории, выполняется расчет точек перемещения робота по траектории с шагом Δt , используя формулу 5. Результатом первого этапа является множество координат перемещения $P^{(i)}$ для первого робота, которые гарантируют его безопасное движение по траектории без столкновений с препятствиями. На втором этапе выполняется планирование траекторий для всех роботов группы. Начальные условия для первого робота остаются прежними, для остальных роботов в группе получаются по формуле 10. Для формирования диапазонов промежуточных вершин используются формулы 11 и 12. Сформировав промежуточные вершины траектории, выполняется расчет максимального времени перемещения по траекториям роботов. Предварительно, вычисляются по 3 время перемещения для каждого робота и оценивается по 2 максимальное время. Вычислив максимальное время перемещения роботов, выполняется расчет точек перемещения каждого робота по траектории с шагом Δt , используя формулу 5). Для первого и второго этапа, используя формулу 7, выполняется вычисление координат перемещения препятствий на основе начальных значений положения препятствия $C_1^{(s)}$, которые формируются в множество. Учитываются взаимные ограничения между роботами, такие как минимальное расстояние между ними и зоны ответственности. Это позволяет минимизировать риск столкновений между роботами и обеспечить эффективную координацию их действий.

Блок-схема генетического алгоритма рис. 4 демонстрирует процесс формирования траектории и оценку возможных столкновений.

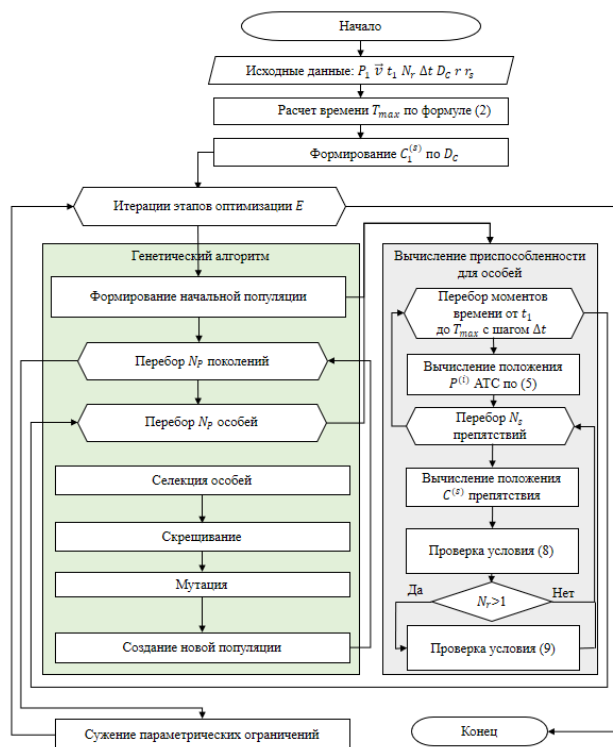


Рис. 4. Блок-схема генетического алгоритма

Генетический алгоритм принимает на вход начальные координаты траектории и диапазоны допустимых скоростей для каждого отрезка пути. Алгоритм начинает работу с создания множества случайных решений траекторий, каждое из которых представляет собой набор промежуточных точек и скоростей. Каждая траектория оценивается на предмет безопасности, то есть отсутствия столкновений с препятствиями условие 7, и оптимальности, которая включает минимизацию затрат времени и энергии. Лучшие решения выбираются для дальнейшего использования, после чего применяются операторы скрещивания и мутации: скрещивание комбинирует характеристики двух "родительских" решений, а мутация вносит случайные изменения в параметры траекторий для увеличения разнообразия решений. Шанс мутации особи может случиться с вероятностью M . После прохождения каждой эпохи оптимизации E алгоритм выполняет сужение параметрических ограничений: диапазонов промежуточных вершин D_p и скоростей D_v робота. Процесс повторяется до достижения заданного числа E или выполнения критериев завершения. На основе этих данных алгоритм генерирует множество промежуточных точек, которые проверяются на соответствие условиям безопасности. Выполняется оценка по двум критериям: условие 7 проверяет отсутствие столкновений между роботом и препятствиями, а условие 8 – отсутствие столкновений между роботами при $N_r > 1$. Если условия выполнены, соответствующие координаты сохраняются как лучшие для текущей итерации. В противном случае генетический алгоритм продолжает генерацию новых вариантов траекторий с использованием операторов мутации и скрещивания до тех пор, пока не будут найдены безопасные и оптимальные решения.

После завершения формирования всех траекторий метод переходит к визуализации результатов. Графическое представление включает траектории движения каждого робота, расположение препятствий и динамику изменения скоростей.

Численное моделирование. Метод планирования траектории реализован на языке программирования Python. Для тестирования метода проведены 50 экспериментов и приняты следующие исходные данные: Для первого этапа: координаты начальной точки $P_1 = [0 \text{ м} \ 0 \text{ м} \ 0 \text{ м}]^T$, координаты конечной точки $P_N = [20 \text{ м} \ 20 \text{ м} \ 20 \text{ м}]^T$, количество роботов в группе $N_r = 3$, начальное время $t_1 = 0 \text{ с}$, шаг времени $\Delta t = 1 \text{ с}$, радиус описанной окружности АТС $r = 1 \text{ м}$, диапазон возможных значений координат промежуточных точек первая часть параметров $D_p = [0 \text{ м}; 20 \text{ м}]$, диапазон возможных значений скоростей на каждом из отрезков вторая часть параметров $D_v = [0 \text{ м/с}; 1 \text{ м/с}]$, вид препятствий – сферы. Параметры препятствий, генерируемые случайно: направление движения, диапазон возможных значений начального положения препятствий по каждой из осей $D_C = [1 \text{ м}; 20 \text{ м}]$, диапазон возможного значения радиуса препятствий $r_s \in [1 \text{ м}; 3 \text{ м}]$, диапазон возможных значений скоростей препятствий $D_{\vec{v}} = [0 \text{ м/с}; 1 \text{ м/с}]$. Для второго этапа: для каждого робота, кроме первого формируются начальные и конечные координаты по формуле 10 относительно координат первого, диапазон возможных значений координат промежуточных точек первая часть параметров и диапазон возможных значений скоростей на каждом из отрезков вторая часть параметров формируются на основе результатов первого этапа по формулам 11 и 12, случайный параметр $C_t \in [-5 \text{ м}; 5 \text{ м}]$ остальные исходные данные не изменились. Параметры препятствий не меняются. Исходные данные генетического алгоритма были приняты следующие: эпохи оптимизации $E = 10$, количество начальной популяции $N_p = 10$, количество особей $N_C = 30$, процент мутаций $M = 20\%$.

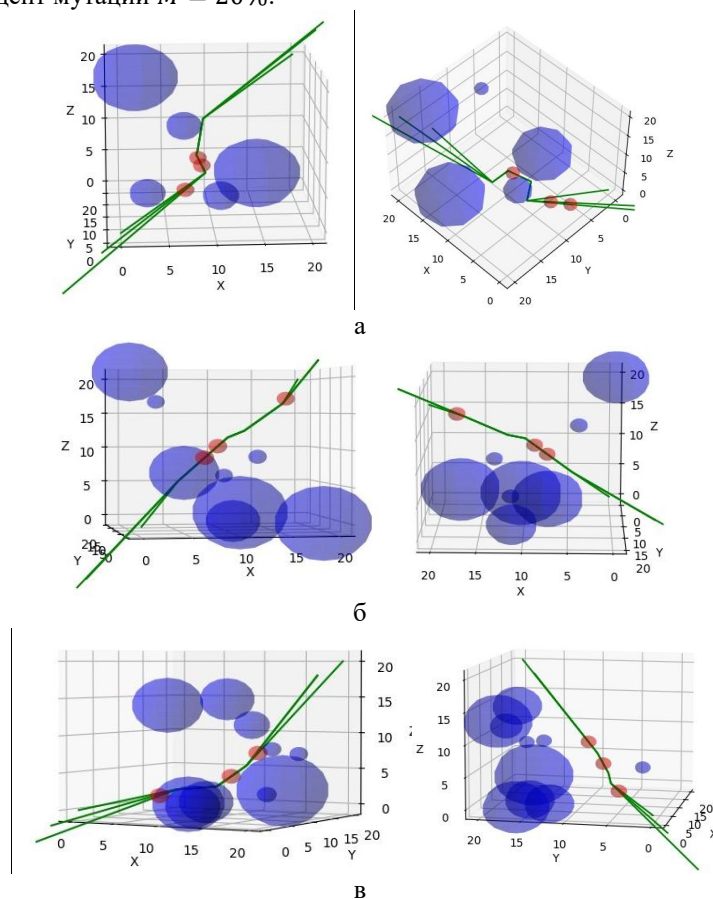


Рис. 5. Результаты визуализации: а – при количестве препятствий 5, б – при количестве препятствий 10, в – при количестве препятствий 15

Визуализация результатов выполнена с использованием библиотеки Matplotlib языка программирования Python. Она позволила создать анимацию перемещения роботов и препятствий, чтобы оценить сформированную траекторию на исключение столкновений.

Исходные данные одинаковые для обоих экспериментов, но результаты различны, так как начальные позиции препятствий, а также роботов в группе, за исключением первого робота, меняются при каждом запуске. Количество препятствий принимались от 5 до 10 с увеличением на 1. В ходе экспериментов оценивались корректность траектории и время вычислений.

Результаты тестирования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследования при тестировании метода

Номер эксперимента	Количество препятствий					
	5	6	7	8	9	10
	Время итерации, с					
1	26	29	30	110	60	110
2	25	35	52	55	47	60
3	27	34	48	41	132	67
4	29	30	54	40	42	124
5	35	34	65	86	57	37
Среднее значение	28,4	32,4	49,8	66,4	67,6	79,6

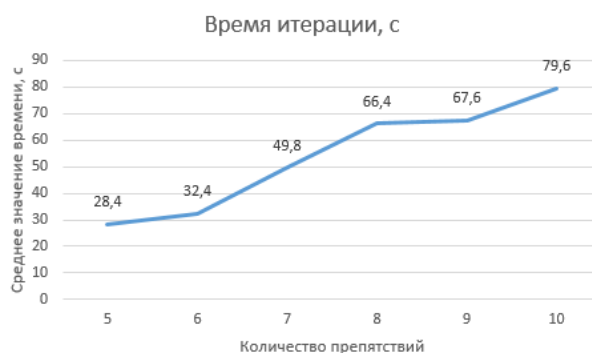


Рис. 6. График среднего значения времени относительно количества препятствий

На рис. 5 представлены несколько результатов экспериментов при указанных количествах препятствий. На рис. 6 показан график возрастания среднего значения времени относительно количества препятствий. Анализируя полученные результаты рис. 5 и 6, было выявлено, что с увеличением количества препятствий увеличивается значение среднего времени выполнения итерации и, вследствие, качество сформированной траектории.

Заключение. В результате проведенного исследования была разработана и экспериментально подтверждена эффективность метода планирования траекторий движения группы мобильных роботов с использованием генетического алгоритма. Метод обеспечивает безопасное движение роботов, исключая столкновения как между собой, так и с внешними препятствиями, включая движущиеся объекты.

Основные результаты работы: Разработана математическая модель планирования траекторий, учитывающая три основных сценария возможных столкновений: между роботами, со стационарными и подвижными препятствиями. Предложена двухэтапная процедура построения траекторий: Первый этап – построение траектории для первого робота; Второй этап – последовательное построение траекторий для остальных роботов с учетом уже спланированных маршрутов. Реализован генетический алгоритм формирования

промежуточных точек траекторий, обеспечивающий оптимальность и безопасность движения. Проведено численное моделирование на языке программирования Python с использованием библиотеки Matplotlib для визуализации результатов. Экспериментальные исследования показали зависимость времени вычислений от количества препятствий в операционной среде. При увеличении числа препятствий возрастает как время расчета, так и качество сформированных траекторий.

Разработанный метод может быть применен для управления группами мобильных роботов в различных прикладных задачах, где требуется координированное движение нескольких автономных объектов в динамически меняющейся среде.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-49-02073 <https://rscf.ru/project/24-49-02073/> с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pertzovsky A., Zivan R., Agmon N. Collision Avoiding Max-Sum for Mobile Sensor Teams, *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2024, Vol. 79, pp. 1281-1311.
2. Wang S., Hu X., Xiao J., Chen T. Repulsion-Oriented Reciprocal Collision Avoidance for Multiple Mobile Robots, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2022, Vol. 104 (1).
3. Teng Y., Feng T., Li J., Chen S., Tang X. A Dual-Layer Symmetric Multi-Robot Path Planning System Based on an Improved Neural Network-DWA Algorithm, *Symmetry*, 2025, Vol. 17 (1), pp. 85.
4. Iakovlev D., Tachkov A. Probability of Collision between Autonomous Mobile Robot with an Obstacle, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, Vol. 22 (3), pp. 125-133.
5. Zheng K. Autonomous Obstacle Avoidance and Trajectory Planning for Mobile Robot Based on Dual-Loop Trajectory Tracking Control and Improved Artificial Potential Field Method, *Actuators*, 2024, Vol. 12 (1), pp. 37.
6. AbuJabal N., Rabie T., Baziyad M., Kamel I., Almazrouei K. Path Planning Techniques for Real-Time Multi-Robot Systems: A Systematic Review, *Electronics*, 2024, Vol. 13 (12), pp. 2239.
7. Qiu H., Yu W., Zhang G., Xia X., Yao K. Multi-robot Collaborative 3D Path Planning Based On Game Theory and Particle Swarm Optimization Hybrid Method, *The Journal of Supercomputing*, 2025, Vol. 81 (3).
8. Malyshev D., Cherkasov V., Rybak L., Diveev A. Advances in Optimization and Applications, *OPTIMA 2022. Communications in Computer and Information Science*, 2023, pp. 197.
9. Pisarenko A., Malyshev D., Rybak L., Cherkasov V., Skitova V. Application of evolutionary PSO algorithms to the problem of optimization of 6-6 UPU mobility platform geometric parameters, *Procedia Computer Science*, 2022, Vol. 213 (4), pp. 643-650.
10. Ren Y., Friderikos V. Path Planning Optimization Based Interference Awareness for Mobile Robots in mmWave Multi Cell Networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, Vol. PP (99), pp. 1-12.
11. Sahoo S. K., Choudhury B. A review of methodologies for path planning and optimization of mobile robots, *Journal of Process Management and New Technologies*, 2023, Vol. 11 (1-2), pp. 34-52.
12. Nasti S., Najar Z., Chishti M.A. A Comprehensive Review of Path Planning Techniques for Mobile Robot Navigation in Known and Unknown Environments, *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 2024, Vol. 11 (1).
13. Yang L., Li P., Qian S. [et al.]. Path Planning Technique for Mobile Robots: A Review, *Machines*, 2023, Vol. 11 (10), pp. 980.
14. Chen J. Algorithmic Implementation and Optimisation of Path Planning, *Applied and Computational Engineering*, 2024, Vol. 33 (1), pp. 176-184.
15. Khan N., Butt Y., Bhatti A. Constraint-Oriented Formation Control of Multi-Robot System in Leaderless Consensus under Confined Conditions, *Systems Science & Control Engineering*, 2024, Vol. 12 (1).
16. Hamdan N., Medvedev M., Pshikhov V. Method of motion path planning based on a deep neural network with vector input, *Mechatronics, Automation, Control*, 2024, Vol. 25 (11), pp. 559-567.
17. Diveev A., Sofronova E., Konyrbaev N., Ibadulla S. System Synthesis for Motion along the Trajectory by Evolutionary Machine Learning Control, *Engineered Science*, 2024, Vol. 29, pp. 1130.
18. Diveev A., Sofronova E., Konyrbaev N., Abdullayev O. Advanced Model with a Trajectory Tracking Stabilisation System and Feasible Solution of the Optimal Control Problem, *Mathematics*, 2024, Vol. 25 (11), pp. 3193.
19. Lv Y. Research on Path Planning of Mobile Robots Based on A* and B* Algorithms, *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 2024, Vol. 120, pp. 392-397.

20. Luo D., Huang X., Huang Y., Miao M., Gao X. Optimal Trajectory Planning for Wheeled Robots (OTPW): A Globally and Dynamically Optimal Trajectory Planning Method for Wheeled Mobile Robots, *Machines*, 2024, Vol. 12 (10), pp. 668.
21. Han J., Ma C., Zou D. [et al.]. Distributed Multi-Robot SLAM Algorithm with Lightweight Communication and Optimization, *Electronics*, 2024, Vol. 13 (20), pp. 4129.
22. Zhang X., Zheng H. Research On Trajectory Planning Methods of Mobile Robots Based on SLAM Technology, *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 2024, Vol. 111, pp. 116-125.

Рыбак Лариса Александровна – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; e-mail: rlbgtu@gmail.com; г. Белгород, Россия; тел. 74722230530; д.т.н.; профессор, директор НИИ Робототехники и систем управления.

Малышев Дмитрий Иванович – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; e-mail: malyshev.d.i@ya.ru; г. Белгород, Россия; тел. 79507134397; м.н.с.

Дьяконов Дмитрий Алексеевич – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; e-mail: furno.xl@yandex.ru; г. Белгород, Россия; тел. 79606958167; инженер–исследователь.

Мамченкова Анастасия Александровна – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; e-mail: mamchenkova03@yandex.ru; г. Белгород, Россия; тел. +79192282256; м.н.с.

Rybak Larisa Alexandrovna – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: rlbgtu@gmail.com; Belgorod, Russia; phone: +74722230530; dr. of eng. sc.; professor, director of Research Institute of Robotics and Control Systems.

Malyshev Dmitry Ivanovich – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: malyshev.d.i@ya.ru; Belgorod, Russia; phone: +79507134397; junior researcher.

Dyakonov Dmitry Alekseevich – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: furno.xl@yandex.ru; Belgorod, Russia; phone: +79606958167; research engineer.

Mamchenkova Anastasia Aleksandrovna – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: mamchenkova03@yandex.ru; Belgorod, Russia; phone: +79192282256; junior researcher.

УДК 519.876.5

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-185-193

А.Ю. Тамм, Е.А. Барымова, М.И. Кузьмин

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СПАЙКОВОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ И МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ РТК

Одной из ключевых параметров любой современной механической системы является её вибрационные и акустические характеристики, оказывающие прямое воздействие на окружающую среду и человека в процессе работы. В связи с этим, актуальной остается задача диагностики вибрационных характеристик различных сложных по структуре механических объектов, к которым можно отнести промышленные робототехнические комплексы. В силу затрудненности возможности проведения диагностирования и экспериментальной отладки новых разрабатываемых механизмов, интересным является вопрос применения современных подходов к решению задачи диагностики, в частности, с применением нейронных сетей и численных методов. Целью данной работы стало исследование возможности совместного применения спайковой нейронной сети и метода конечных элементов для оценки вибрационных характеристик на примере подшипника волнового редуктора. В работе подробно описан алгоритм проведения диагностики, включающий в себя этапы разработки как конечно-элементной модели исследуемой механической системы, так и разработки архитектуры нейронной сети. При этом генерация обучающего и контрольного наборов данных для нейронной сети проводится на упрощенной конечно-элементной модели, имеющей характеристики, аналогичные детализированной, что обеспечивается совпадением первых десяти собственных форм сборки. Наборы данных сформированы на основе расчетов численными методами с применением явной схемы

интегрирования во времени упрощенной модели редуктора с несколькими типами искусственно внесенных дефектов, аналогичных проявляющимся в процессе эксплуатации реального подшипника. Для анализа частотных характеристик разработана архитектура спайковой нейронной сети, доработанная в дальнейшем на обучающем наборе единичных дефектов. В результате исследования определено, что разработанная спайковая нейронная сеть обеспечивает классификацию данных на контрольной выборке с точностью 85%, что позволяет сделать вывод о применимости предлагаемой методики определения вибросостояния механических систем с совместным использованием нейронных сетей и метода конечных элементов.

Импульсные нейронные сети; конечно-элементное моделирование; мультидисциплинарные исследования; диагностика систем.

A.Yu. Tamm, E.A. Barymova, M.I. Kuzmin

STUDY OF THE APPLICATION OF THE SPIKING NEURAL NETWORK AND FINITE ELEMENT METHOD FOR DIAGNOSTICS OF ROBOT ASSEMBLIES

One of the key parameters of any modern mechanical system is its vibration and acoustic characteristics, which have a direct impact on the environment and humans during operation. In this connection, the task of diagnosing the vibration characteristics of various complex mechanical objects, to which industrial robotic complexes can be referred, remains relevant. Due to the difficulty in carrying out diagnostics and experimental debugging of newly developed mechanisms, it is interesting to apply modern approaches to solving the problem of diagnostics, in particular, with the use of neural networks and numerical methods. The purpose of this work was to investigate the possibility of joint application of spike neural network and finite element method for estimation of vibration characteristics on the example of wave gearbox bearing. The paper describes in detail the algorithm of diagnostics, which includes the stages of development of both the finite element model of the investigated mechanical system and the development of the neural network architecture. At the same time, the generation of training and control datasets for the neural network is carried out on a simplified finite element model having characteristics similar to the detailed one, which is ensured by the coincidence of the first ten eigenforms of the assembly. The data sets were generated on the basis of numerical calculations using an explicit scheme of integration in time of a simplified model of a gearbox with several types of artificially introduced defects similar to those appearing during operation of a real bearing. To analyze the frequency characteristics, a spike neural network architecture was developed and further improved on a training set of single defects. As a result of the study it was determined that the developed spike neural network provides classification of data on the control dataset with 85% accuracy, which allows us to conclude about the applicability of the proposed method of determining the vibration state of mechanical systems with the joint use of neural networks and finite element method.

Pulse neural networks; finite element modeling; multidisciplinary research; system diagnostics.

Введение. Вибрационная диагностика – метод диагностирования технических систем и оборудования, основанный на анализе параметров вибрации, либо создаваемой работающим оборудованием, либо являющейся вторичной вибрацией, обусловленной структурой исследуемого объекта.

При вибрационной диагностике, как правило, исследуются временной сигнал или спектр вибрации того или иного оборудования. Основными исследуемыми показателями в таком случае являются виброскорость, виброперемещение, виброускорение [1, 2].

Дефекты механических систем, как правило, отражаются на характере вибрации. Измерение показателей вибрации в соответствии с ГОСТ Р ИСО 7919-1-99 [3] позволяет получить сведения о техническом состоянии объекта, его неисправностях и остаточном потенциале.

Наибольшее развитие данный метод получил при диагностировании механических систем с вращающимися узлами, такие как подшипники, роторные машины, редукторы, двигатели и т.д.

Развитием методов вибрационной диагностики являются виброакустические методы, направленные на анализ акустической эмиссии и применяемые для определения допустимых границ эксплуатации оборудования, диагностирования его состояния и оценки акустического воздействия на человека. Для этого проводится идентификация и классификация вибрации и шумов, создаваемых механизмом. Примерами таких систем могут быть строительное оборудование, средства передвижения, электроника и любые другие системы, оказывающие влияние на безопасность и комфорт человека.

Основная часть современных исследований в области детектирования дефектов посвящена применению различных методов виброакустического анализа к экспериментальным установкам конкретных механических систем.

Так, в работе [4] представлен анализ зависимости частотной характеристики волнового редуктора под нагрузкой, полученной в предположении применимости теории оболочек, от размеров зуба гибкого колеса, эксцентрика и дисбаланса.

В статье [5] предложен подход к выявлению дефектов роликовых подшипников горнодобывающего оборудования. Проведен анализ причин появления повреждений и произведена разработка соответствующего ПО для анализа виброперемещений с использованием вейвлет-преобразования.

В работе [6] описан метод испытаний и экспериментальная установка для оценки крутильных колебаний волнового редуктора путем анализа спектра ускорений, получаемых акселерометром, размещенном на консольной балке, имитирующей звено манипулятора. При наличии дефекта в низкочастотной области спектра проявляются характерные всплески.

Часть работ посвящена сбору и анализу причин возникновения различных типов дефектов в механизмах. Например, в статье [7] проведена систематизация дефектов, возникающих в различных деталях редукторов. Описаны неисправности генератора волн и зубьев, а также проблемы, связанные с коррозией, смазкой и потерей устойчивости гибкого колеса. Изучено возникновение трещин в деталях редуктора и их причины.

В последнее время для решения задач выявления дефектов в механических системах развиваются подходы с использованием технологий машинного обучения для идентификации и классификации дефектов [8–10].

В частности, в статье [11] представлен подход для автоматизированного определения состояния волновых редукторов с применением сверточных нейронных сетей СНС. В данных, полученных от нескольких датчиков, путем выполнения процедуры ранговой корреляции Спирмена выявляются значимые каналы для каждого из состояний, проводится их нормализация и классификация с помощью многомасштабной СНС (Multiscale Convolutional Neural Network MSCNN). В результате работы проведено тестирование разработанной нейронной сети НС на данных, полученных на экспериментальной установке для исследования реального промышленного робота, которая показала, что точность классификации сетью составляет выше 96%.

Применение метода конечных элементов МКЭ для оценки вибросостояния компонентов механических систем также является одним из перспективных направлений исследований. В работе [12] приведен пример валидации конечно-элементной КЭ модели планетарного редуктора. Путём конечно-элементного моделирования КЭМ для отдельных частей редуктора и в сборе были определены первые 10 собственных частот и форм колебаний. На экспериментальной установке получены частотные характеристики редуктора в зависимости от частот вращения. Также путем анализа частотных характеристик на модели и на стенде сделаны выводы об элементах конструкции, вносящих наибольший вклад в вибрацию.

Описание или постановка решаемой задачи. Перспективным направлением развития виброакустических методов является совместное применение численных методов для решения задачи построения характеристики класса состояний и моделей машинного обучения для классификации состояний.

Такой переход от эмпирических методов исследования вибросостояния объекта к использованию цифровых моделей, открывает новые возможности к обследованию сложных технических систем, в которых невозможно напрямую измерять вибрационные характеристики в силу сложности конструкции, а также позволяет разрабатывать инструменты диагностики до появления опытного образца системы.

В общем виде задачу диагностирования по вибросостоянию можно разделить на две подзадачи:

- 1) построение виброакустических образов классов состояний;
- 2) отнесение наблюдаемых виброакустических образов к конкретному классу состояний.

Для решения первой задачи в разработанном алгоритме используется МКЭ, в результате применения которого получаются спектральные характеристики перемещений, формирующие обучающий и тестовый наборы данных. Для решения второй задачи применяется импульсная нейронная сеть ИмНС, выполняющая определение наличия дефектов по спектральным характеристикам перемещений.

Место разработанного алгоритма совместного использования МКЭ и импульсной нейронной сети ИмНС в процессе диагностики системы представлено на рис. 1. За основу взята функциональная схема технического диагностирования [13], доработанная с учетом изменений, связанных с использованием системы поддержки моделирования (Simulation process design management – SPDM и замены набора решающих правил экспертной системы на классификацию с использованием ИмНС.

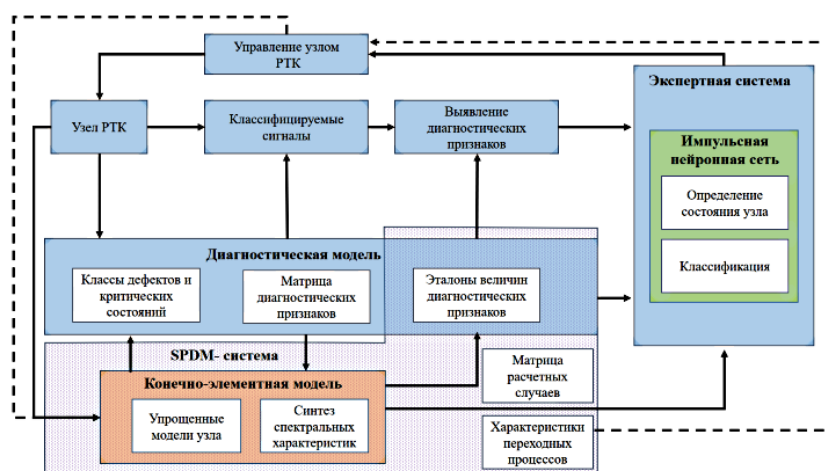


Рис. 1. Функциональная схема совместного использования МКЭ и ИмНС для задач виброакустической диагностики

Задача SPDM системы в данном случае в накоплении данных о результатах моделирования с использованием МКЭ состояний узла РТК с привнесенными дефектами, а также в хранении и систематизации самих расчетных моделей и синтезированных спектральных характеристик.

Методика исследования. В настоящее время широко известны примеры использования для решения задач классификации искусственных НС [14], основанных на перцептронной модели нейрона. Тем не менее данные НС обладают существенными недостатками: необходимость большого объема обучающих примеров, слабая объяснимость и пр. [15], что ограничивает практическое применение подобных НС в задачах с малым количеством примеров.

Помимо перцептрона известны разнообразные импульсные модели нейронов: точечные, пространственные, биоинспирированные, порогового интегратора, сегментная спайковая модель CSNM, Ижикевича, Ходжкина-Хаксли [16].

При разработке представляемого алгоритма использовалась ИмНС на основе сегментно-спайковой модели нейрона CSNM

Выбор ИмНС для классификации состояния обусловлен тем, что для обучения НС, реализующих подобную модель, достаточно малого количества примеров, а также с перспективами значительного повышения производительности подобных сетей при исполь-

зовании специализированных вычислителей. Детальное описание модели нейрона, используемой при реализации представляемого алгоритма, можно найти в [17]. Ключевой особенностью подобной модели в контексте практического применения для задач вибродиагностики является возможность структурной адаптации сети: для каждого вновь встреченного класса возможно наращивать новый нейрон в сети, что в перспективе может быть использовано для создания самообучающихся систем диагностики.

На первом шаге алгоритма рис. 2 формируется перечень возможных производственных дефектов или критических состояний рассматриваемого узла робототехнического комплекса РТК.

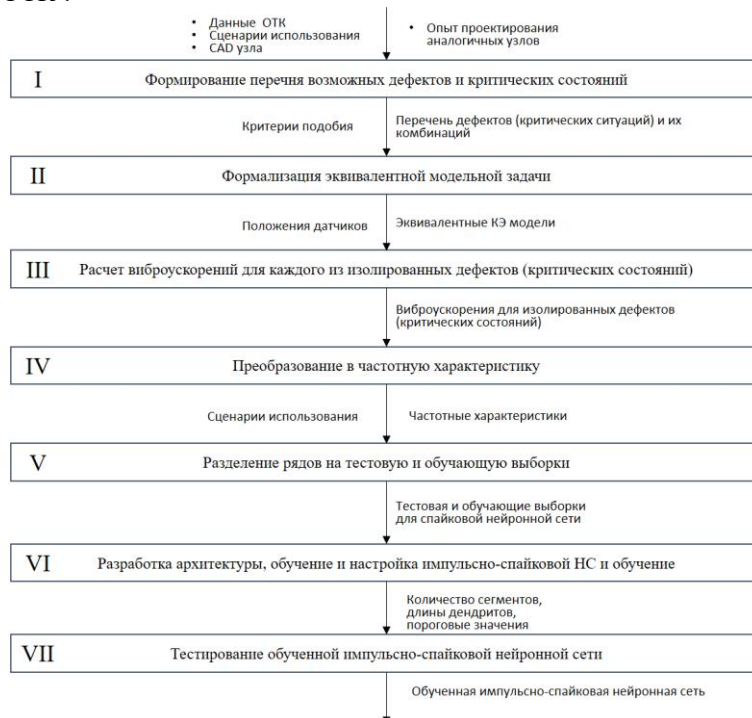


Рис. 2. Алгоритм совместного использования МКЭ и ИмНС для диагностики узла РТК

На втором шаге разрабатывается упрощенная модель, эквивалентная по макропараметрам проектируемому узлу РТК. При этом в упрощенной модели должны учитываться характерные особенности геометрии рассматриваемого узла, влияющие на его собственные частоты и формы колебаний. Например, для волнового редуктора потребуется моделирование эксцентрика, подшипника, деформируемого колеса и жесткого колеса, а при оценке дефектов в зубчатом зацеплении и его. В качестве критериев эквивалентности упрощенной модели можно использовать близость первых 10 собственных частот и форм колебаний упрощенной модели к характеристикам рассматриваемого узла РТК, на котором в дальнейшем предполагается использовать обученную НС. Исходя из заранее сформированного перечня потенциальных дефектов, составляется матрица расчетных случаев для упрощенной модели и выбирается точка расположения датчика перемещений.

На третьем шаге поочередно для каждого из рассматриваемых дефектов выполняется расчет с использованием упрощенной модели методом конечных элементов в явной постановке и определяются зависимости компонент перемещений от времени в выбранной точке расположения датчика с привнесенными в конструкцию дефектами. Массив полученных зависимостей перемещений в выбранной точке конструкции для каждого дефекта является исходными данными для формирования синтетического обучающего набора данных.

На четвертом шаге полученный массив векторов перемещений путем приведения к единому масштабу 1 и быстрого преобразования Фурье трансформируется в частотную характеристику для каждого варианта дефектов. Аналогичным образом формируется синтетический набор для тестирования НС.

$$x'(t) = \frac{x(t) - \overline{x(t)}}{\sigma(x(t))}, \quad (1)$$

где $x(t)$ – исходный временной ряд; $\overline{x(t)}$ – среднее значение временного ряда; σ – среднеквадратичное отклонение.

В общем случае для тестирования и валидации НС используются зависимости перемещений, полученные в результате натурных испытаний. При этом по мере более детальной проработки проектируемого узла РТК для синтеза наборов данных целесообразно использовать все более адекватную и менее упрощенную модель. Одним из путей повышения адекватности модели является детальное моделирование зубчатого зацепления с использованием МКЭ, при этом наряду с адекватностью модели необходимо учитывать ограниченность вычислительных ресурсов, т.е. использовать подходы к моделированию, позволяющие сократить время вычислений, пример подобного подхода приведен в [18].

На пятом шаге преобразованные данные разделяются на обучающую и тестовые выборки, причем тестовая выборка включает в себя только результаты КЭ расчета с комбинацией дефектов. Также на этом шаге выбирается архитектура нейронной сети.

На шестом шаге проводится обучение НС. Обучение проводится путем наращивания длин дендритов, критерием выступает среднее значение ошибки при классификации примеров из обучающей выборки.

На последнем, седьмом шаге осуществляется тестирование разработанной импульсной сети на подготовленной ранее тестовой выборке.

Последние два шага имеют итерационный характер и ограничены допустимой точностью классификации НС, получаемой в результате тестирования.

После завершения обучения НС ее можно применять для определения наличия дефектов в рассматриваемом узле РТК при их комбинации. При этом на вход подается частотная характеристика зависимости перемещений от времени для характерной точки рассматриваемого узла РТК.

Результаты исследования. Далее представлены результаты применения данного алгоритма в частном случае классификации состояния волнового редуктора РТК для определения наличия комбинации дефектов в подшипнике.

В качестве характерных состояний были выбраны следующие:

- ♦ отсутствие дефектов;
- ♦ наличие радиального биения;
- ♦ наличие осевого биения;
- ♦ наличие несоосности;
- ♦ наличие дисбаланса масс.

Для каждого из видов дефектов была введена степень выраженности дефекта и рассматривалось по 8 ее уровней. Таким образом было рассмотрено 32 обучающих примера.

В качестве тестовых данных использовалось 16 примеров комбинаций несоосности с одним из других рассматриваемых дефектов.

При этом для выполнения четвертого шага после выбора и сортировки в порядке возрастания 5 ведущих частот для каждого временного ряда формируется вектор из 15 признаков. Для компенсации разброса частот при переводе в задержки импульсов по методике, описанной в [19] проводилось их логарифмирование.

В представляемой частной реализации рассматривалось два варианта архитектуры НС:

- ♦ 4 нейрона, по одному нейрону на дефект;
- ♦ 12 нейронов, по одному нейрону на каждую компоненту перемещений характерной точки.

В итоге наилучшие результаты были получены при использовании архитектуры с одним нейроном на один вид дефекта, при этом было выполнено двухэтапное обучение:

♦ настройка структуры нейронов методом структурного обучения [20] по усреднённым задержкам для всех тестовых примеров каждого класса;

♦ донастройка порогов нейронов в течение 10 эпох по задержкам 32 примеров.

В конце каждой итерации происходило тестирование на всей тестовой выборке. В качестве функции потерь использовалось среднеквадратичное отклонение между полученным и целевым ответами, для наращивания длин дендритов использовался оптимизатор Adam [21].

Таблица 1

Результаты классификации комбинированных дефектов волнового редуктора

Архитектура	Использование фильтрации частот по порогу	Точность определения дефекта	
		Обучающие данные	Тестовые данные
4 нейрона по одному нейрону на дефект	да	100%	62,5%
	нет	97,66%	85,94%
12 нейронов по нейрону на каждую компоненту перемещений	да	89,84%	71,88%
	нет	93,75%	75%

В табл. 1 представлены результаты классификации комбинированных дефектов с помощью ИмНС, обученной на данных синтетическом наборе данных, полученных с применением МКЭ. При этом при обучении НС не получала в качестве примеров частотные характеристики для конструкции с комбинированными дефектами. Наибольшая точность для рассмотренных архитектур НС составила 85%.

Выводы. Таким образом показана принципиальная возможность использования разработанного алгоритма для совместного применения ИмНС и МКЭ для диагностики узлов РТК при определении наличия комбинаций дефектов в конструкции по виброускорениям.

Дальнейшие исследования предполагают расширение номенклатуры дефектов, определение рациональной архитектуры ИмНС, а также определение минимальной достаточной адекватности упрощенной модели в зависимости от рассматриваемых дефектов и критических состояний узла РТК.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пархоменко П.П. О технической диагностике. – М.: Знание, 1969. – 90 с.
2. Челомей В.Н. и др. Вибрации в технике. Т. 5. – М.: Машиностроение, 1981. – 496 с.
3. ГОСТ Р ИСО 7919-1-99. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на вращающихся валах. Общие требования. – М.: Госстандарт.
4. Masoumi M., Alimohammadi H. An investigation into the vibration of harmonic drive systems // Frontiers of Mechanical Engineering. – 2013. – Vol. 8. – P. 409-419.
5. Gerike B., Mokrushev A. The Detection of Defects in Rolling Bearings Based on the Analysis of Vibroacoustic Signal // Proceedings of the 9th China- u ssia Symposium: “Coal in the 21 Century: Mining, Intelligent Equipment and Environment Protection”. – 2018.
6. Huang D., Zong P., Jingjun G. Defect elimination in torsional harmonic reducer based on harmonic resonance // Vibroengineering PROCEDIA. – 2019. – Vol. 28. – P. 6.
7. Raviola A., De Martin A., Guida R., Jacazio G., Mauro S., & Sorli M. Harmonic Drive Gear Failures in Industrial Robots Applications: An Overview // PHM Society European Conference. – 2021. – Vol. 6.
8. Abdeljaber O., Avci O., Kiranyaz S., Gabbouj M., Inman D. Real-Time Vibration-Based Structural Damage Detection Using One-Dimensional Convolutional Neural Networks // Journal of Sound and Vibration. – 2016. – Vol. 388. – P. 154-170. – DOI: 10.1016/j.jsv.2016.10.043.
9. Abdeljaber O., Sassi S., Avci O., Kiranyaz S., Ibrahim A., Gabbouj M. Fault Detection and Severity Identification of Ball Bearings by Online Condition Monitoring // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. –DOI: 10.1109/TIE.2018.2886789.

10. Avci O., Abdeljaber O., Kiranyaz S., Hussein M., Gabbouj M., Inman D. A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2021. – Vol. 147.
11. Yang G., Zhong Y., Yang L., Du R. Fault Detection of Harmonic Drive Using Multiscale Convolutional Neural Network // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2020.
12. Wang H., Fang K., Li, Jie, Xi, Chaofei. Analysis and experimental study on vibration characteristics of the RV reducer // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2023.
13. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин. – Омск: ОмГТУ, 2011. – 414 с.
14. Shrestha A., Mahmood A. Review of Deep Learning Algorithms and Architectures // *IEEE Access*. – 2019.
15. Calude C.S., Heidari S., Sifakis J. What perceptron neural networks are (not) good for? // *Information Sciences*. – 2023. – Vol. 621.
16. Yamazaki K., Vo-Ho V.-K., Bulsara D., Le N. Spiking Neural Networks and Their Applications: A Review // *Brain Sci*. – 2022. – Vol. 12.
17. Бахшиев А.В., Демчева А.А. Сегментная спайковая модель нейрона // *Известия вузов. ПНД*. – 2022. – Т. 30, № 3. – С. 299-310.
18. Кузьмин М.И., Тамм А.Ю., Прохоренкова И.Г. Разработка методики моделирования зубчатого зацепления волнового редуктора с применением МКЭ // *Экстремальная робототехника*. – 2024. – № 1 (34). – С. 376-386.
19. Корсаков А.М., Астапова Л.А., Бахшиев А.В. Применение сегментной спайковой модели нейрона со структурной адаптацией для решения задач классификации // *Информатика и автоматизация*. – 2022. – Т. 21, № 3. – Р. 493-520.
20. Бахшиев А.В., Корсаков А.М., Астапова Л.А., Станкевич Л.А. Структурная адаптация сегментной спайковой модели нейрона. – Институт прикладной физики Российской академии наук, 2021.
21. Kingma D.P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization // *arXiv:1412.6980 [cs]*. – arXiv, 2017.

REFERENCES

1. Parkhomenko P.P. О технической диагностике [On technical diagnostics]. Moscow: Znanie, 1969, 90 p.
2. Chelomey V.N. i dr. Vibratsii v tekhnike [Vibrations in engineering]. Vol. 5. Moscow: Mashinostroyeniye, 1981, 496 p.
3. GOST R ISO 7919-1-99. Kontrol' sostoyaniya mashin po rezul'tatam izmereniy vibratsii na vrashchayushchikhsya valakh. Obshchie trebovaniya [GOST R ISO 7919-1-99. Machine condition monitoring based on vibration measurements on rotating shafts. General requirements]. Moscow: Gosstandart.
4. Masoumi M., Alimohammadi H. An investigation into the vibration of harmonic drive systems, *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2013, Vol. 8, pp. 409-419.
5. Gerike B., Mokrusev A. The Detection of Defects in Rolling Bearings Based on the Analysis of Vibroacoustic Signal, *Proceedings of the 9th China-Russia Symposium: "Coal in the 21 Century: Mining, Intelligent Equipment and Environment Protection"*, 2018.
6. Huang D., Zong P., Jingjun G. Defect elimination in torsional harmonic reducer based on harmonic resonance, *Vibroengineering PROCEDIA*, 2019, Vol. 28, pp. 6.
7. Raviola A., De Martin A., Guida R., Jacazio G., Mauro S., & Sorli M. Harmonic Drive Gear Failures in Industrial Robots Applications: An Overview, *PHM Society European Conference*, 2021, Vol. 6.
8. Abdeljaber O., Avci O., Kiranyaz S., Gabbouj M., Inman D. Real-Time Vibration-Based Structural Damage Detection Using One-Dimensional Convolutional Neural Networks, 2016, Vol. 388, p. 154-170. DOI: 10.1016/j.jsv.2016.10.043.
9. Abdeljaber O., Sassi S., Avci O., Kiranyaz S., Ibrahim A., Gabbouj M. Fault Detection and Severity Identification of Ball Bearings by Online Condition Monitoring, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018. DOI: 10.1109/TIE.2018.2886789.
10. Avci O., Abdeljaber O., Kiranyaz S., Hussein M., Gabbouj M., Inman D. A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, Vol. 147.
11. Yang G., Zhong Y., Yang L., Du R. Fault Detection of Harmonic Drive Using Multiscale Convolutional Neural Network, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020.
12. Wang H., Fang K., Li, Jie, Xi, Chaofei. Analysis and experimental study on vibration characteristics of the RV reducer, *Advances in Mechanical Engineering*, 2023.
13. Kostyukov V.N., Naumenko A.P. Osnovy vibroakusticheskoy diagnostiki i monitoringa mashin [Fundamentals of vibroacoustic diagnostics and monitoring of machines]. Omsk: OmGTU, 2011, 414 p.

14. Shrestha A., Mahmood A. Review of Deep Learning Algorithms and Architectures, *IEEE Access*, 2019.
15. Calude C.S., Heidari S., Sifakis J. What perceptron neural networks are (not) good for?, *Information Sciences*, 2023, Vol. 621.
16. Yamazaki K., Vo-Ho V.-K., Bulsara D., Le N. Spiking Neural Networks and Their Applications: A Review, *Brain Sci.*, 2022, Vol. 12.
17. Bakhshiev A.V., Demcheva A.A. Segmentnaya spaykovaya model' neyrona [Segmental spiking neuron model], *Izvestiya vuzov. PND [Izvestiya VUZov. Applied Nonlinear Dynamics]*, 2022, Vol. 30, No. 3, pp. 299-310.
18. Kuz'min M.I., Tamm A.Yu., Prokhorenkova I.G. Razrabotka metodiki modelirovaniya zubchatogo zatsepleniya volnovogo reduktora s primeneniem MKE [Development of a Methodology for Modeling Gear Engagement of Harmonic Reducer Using FEM], *Ekstremal'naya robototekhnika [Extreme Robotics]*, 2024, NO. 1 (34), pp. 376-386.
19. Korsakov A.M., Astapova L.A., Bakhshiev A.V. Primenenie segmentnoy spaykovoy modeli neyrona so strukturnoy adaptatsiei dlya resheniya zadach klassifikatsii [Application of segmental spiking neuron model with structural adaptation for classification tasks], *Informatika i avtomatizatsiya [Informatics and Automation]*, 2022, Vol. 21, No. 3. pp 493-520.
20. Bakhshiev A.V., Korsakov A.M., Astapova L.A., Stankevich L.A. Strukturnaya adaptatsiya segmentnoy spaykovoy modeli neyrona [Structural adaptation of segmental spiking neuron model]. Institut prikladnoy fiziki Rossiyskoy akademii nauk, 2021.
21. Kingma D.P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization, *arXiv:1412.6980 [cs]*. arXiv, 2017.

Тамм Александр Юрьевич – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: a.tamm@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 79315352707; руководитель научно-исследовательского центра.

Барымова Елизавета Андреевна – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: e.barymova@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 79114660782; математик.

Кузьмин Марк Игоревич – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: kuzmin-mark@bk.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 79523674674; инженер.

Tamm Alexander Yurievich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: a.tamm@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79315352707; head of scientific and research department.

Barymova Elizaveta Andreevna – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: e.barymova@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79114660782; mathematician.

Kuzmin Mark Igorevich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: kuzmin-mark@bk.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79523674674; engineer.

УДК 007:51

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-193-201

Ф.А. Хуссейн, В.А. Костюков

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ МНОГОАГЕНТНОЙ ЗАДАЧИ КОММИВОЯЖЁРА

Рассматривается проблема распределения задач в многоагентной системе, где каждый агент представляет собой робота, а каждая задача представляется позицией, которая должна быть посещена одним агентом. Эта задача очень похожа на многоагентную задачу коммивояжера, которая в отличие от знаменитой задачи коммивояжера, задействует несколько коммивояжеров, которые посещают заданное количество городов ровно один раз и возвращаются в исходное положение с минимальными затратами на поездку. Поэтому проводится анализ многоагентной задачи коммивояжера как представителя задачи целераспределения. Многоагентная задача коммивояжера является важной для области оптимизации маршрутов и распределения задач между несколькими агентами. Она включает в себе две различные, однако, взаимосвязанные под-

задачи: распределение городов между агентами и определение порядка посещения городов каждым агентом. В литературе существуют три концепции решения этой проблемы относительно решения ее двух составляющих подзадач: оптимизационная концепция, где обе подзадачи решаются одновременно; концепция Cluster-First, Route-Second – где сначала решается вопрос о назначении задач каждому коммивояжеру, а потом – вопрос о порядке посещения пунктов назначения для каждого коммивояжера; концепция Route-First, Cluster-Second – где сначала решается вопрос о порядке посещения пунктов назначения, а затем происходит разделение этого цикла между агентами без изменения порядка посещения. В этой работе предлагается гибридный подход к решению многоагентной задачи коммивояжера, который объединяет идеи двух известных концепций: Cluster-First, Route-Second и Route-First, Cluster-Second чтобы получить их позитивные аспекты и избавиться от их негативных сторон. Для оценки эффективности разработанного метода было проведено сравнительное исследование. Оценка результатов осуществлялась на основе трех ключевых критериев: вычислительного времени получения решения многоагентной задачи коммивояжера, суммарной длины пройденных маршрутов коммивояжерами и максимальной длины маршрута среди них. Анализ экспериментальных данных показал, что при использовании предложенного метода максимальная длина пути среди пройденных агентами маршрутов (дисбаланс нагрузки) уменьшается в среднем на 26%.

Задача мульти коммивояжера; распределение задач; целераспределение; многоагентные системы; централизованное управление; групповое управление.

F.A. Houssein, V.A. Kostyukov

HYBRID METHOD FOR SOLVING THE MULTI-AGENT TRAVELING SALESMAN PROBLEM

In this research work, the problem of task allocation in a multi-agent system is considered, where each agent is a robot, and each task is represented by a position, which should be visited by one agent. This problem is very similar to the multi-agent traveling salesman problem, which, unlike the famous traveling salesman problem, involves several traveling salesmen who visit a given number of cities exactly once and return to the starting position with minimal travel costs. Therefore, the multi-agent traveling salesman problem is analyzed as a representative of the task allocation problem. The multi-traveling salesman problem is important for the field of route optimization and task allocation between several agents. It includes two different, but interrelated subproblems: distribute cities among agents and determine the order in which each agent visits cities. In the literature, there are 3 concepts for solving this problem with respect to solving its two constituent subproblems: the optimization concept, where both subproblems are solved simultaneously; The Cluster-First, Route-Second concept is where the question of which tasks to assign to which salesman is first decided, and then the question of the order in which each salesman solves his tasks is decided; The Route-First, Cluster-Second concept is where the question of the order in which tasks should be visited is first decided, and then this cycle is divided between agents without changing the order of visits in order to answer the question of which tasks each agent takes on. This paper proposes a hybrid approach to solving the multiple traveling salesman problem (mTSP), which combines the ideas of two well-known concepts: "First clustering, then routing" and "First routing, then clustering" in order to obtain their positive aspects and get rid of their weaknesses. To evaluate the effectiveness of the developed method, a comparative study was conducted using the classical method for solving the multi-traveling salesman problem. The results were evaluated based on three key criteria: the computational time to obtain a solution to the multi-travelling salesman problem, the total length of the routes travelled by the salesmen, and the maximum route length among them. The analysis of the experimental data showed that when using the proposed method, the maximum path length among the routes travelled by the agents (load imbalance) is reduced by an average of 26%.

Multi-travelling salesman problem; task distribution; goal allocation; multi-agent systems; centralized control; group control.

Введение. Основная идея распределения задач заключается в том, чтобы при заданном наборе задач N_t и множестве агентов N_u найти такое бесконфликтное распределение задач между агентами, которое обеспечивает максимальное значение некоторого глобального критерия качества. Каждый агент может выполнять не более L_t задач, и процесс распределения считается завершенным, когда назначено $N_{min} \triangleq \min\{N_t, N_u * L_t\}$ задач. Если каждая задача назначена только одному агенту, то такое распределение считается бесконфликтным. Предполагается, что глобальный критерий качества представляет собой

сумму локальных критериев, каждый из которых зависит от набора задач, назначенных конкретному агенту. Данная задача распределения может быть формализована в виде целочисленной, возможно, нелинейной модели с бинарными переменными x_{ij} , где x_{ij} указывает, назначена ли задача j агенту i :

$$\max \sum_{i=1}^{N_u} (\sum_{j=1}^{N_t} c_{ij}(X_i, P_i) x_{ij}), \quad (1)$$

при условии:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{N_t} x_{ij} &\leq L_t, \forall i \in I, \\ \sum_{i=1}^{N_u} x_{ij} &\leq 1, \forall j \in J, \\ \sum_{i=1}^{N_u} \sum_{j=1}^{N_t} x_{ij} &= N_{min} \triangleq \min \{N_t, N_u * L_t\}, \\ x_{ij} &\in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in I \times J, \end{aligned}$$

где $x_{ij} = 1$ если агенту i назначена задача j , $X_i \in \{0, 1\}^{N_t}$ – вектор, в котором j -й элемент является x_{ij} , I – набор индексов агентов $I \triangleq \{1, \dots, N_u\}$, J – набор индексов задач $J \triangleq \{1, \dots, N_t\}$, P_i – вектор, представляющий упорядоченную последовательность задач для агента i $P_i \in (J \cup \{\emptyset\})^{L_t}$, его k -й элемент равен j если i -й агент выполняет j -ю задачу в k -ой точке цепочки задач.

Сумма в скобках в формуле 1 представляет локальное вознаграждение для i -го агента. Предполагается, что функция оценки удовлетворяет условию $c_{ij}(X_i, P_i) \geq 0$, т.е. может быть любой неотрицательной функцией либо назначения X_i , либо пути P_i обычно не является функцией обоих.

Когда каждый агент должен выбирать актуальную для выполнения задачу из набора несколько задач, возникает не только проблема оптимального распределения задач между агентами, но и нахождения оптимальной последовательности выполнения задач для каждого агента. Таким образом проблема множественного распределения задач сводится к многоагентной задаче коммивояжера МКВ Multiple Travelling Salesman Problem, MTSP).

В зависимости от целевой функции различают следующие разновидности МКВ:

♦ MinSum МКВ: в этом варианте МКВ целевая функция заключается в минимизации суммы затрат на поездку всех агентов. Формально вариант MinSum моделируется как:

$$\min_{Tour_i \in TOURS} (\sum_{i=1}^m C(Tour_i)), \quad (2)$$

при условии : $Tour_i \cap Tour_j = \emptyset, \forall i \neq j, i \leq 1, j \leq m$,

где i, j – номер коммивояжера, $Tour_i$ – маршрут i -го коммивояжера, m – количество коммивояжеров задачи, $TOURS$ – совокупность всех возможных туров. $C(.)$ – функционал качества длина маршрута.

♦ MinMax МКВ: в этом варианте целевая функция есть стоимость самого длинного маршрута например, с точки зрения расстояния или времени среди всех маршрутов коммивояжеров. Этот случай широко используется в исследованиях, посвященных, например, сокращению времени выполнения миссии и балансировке нагрузки между агентами. Формально говоря, этот вариант моделируется так:

$$\min_{Tour_i \in TOURS} (\max_{j \in 1 \dots m} C(Tour_j)), \quad (3)$$

при условии : $Tour_i \cap Tour_j = \emptyset, \forall i \neq j, i \leq 1, j \leq m$,

♦ MinSum & MinMax многоцелевая МКВ: в этом варианте целевая функция состоит из двух предыдущих функционалов качества.

В данной работе применяются оба критерия – MinSum и MinMax, поскольку использование только MinSum может привести к ситуации, когда несколько коммивояжеров посещают всего один город, а оставшиеся города посещает один коммивояжёр. С другой стороны, использование только MinMax может привести к чрезмерно длинному общему маршруту.

МКВ включает две взаимосвязанные подзадачи:

- ♦ распределение задач городов между коммивояжёрами;
- ♦ определение порядка выполнения задач посещения городов в рамках маршрута каждого коммивояжера.

В научной литературе выделяются три основные концепции решения задачи МКВ, которые различаются подходом к решению соответствующих подзадач.

1. Концепция одновременной оптимизации: обе подзадачи решаются одновременно.
2. Концепция "Сначала кластеризация, затем маршрутизация" (Cluster-First, Route Second, CF S : сначала задачи распределяются между коммивояжёрами, а затем для каждого из них строится оптимальный маршрут МКВ сводится к нескольким задачам коммивояжёра .
3. Концепция "Сначала маршрутизация, затем кластеризация" Route-First, Cluster Second, FCS : сначала строится общий маршрут для всех задач, который затем разделяется между коммивояжёрами МКВ сводится к одной задаче коммивояжёра .

Обзор литературы. В рамках первой концепции решения МКВ обе её подзадачи решаются одновременно. Алгоритмы или метаэвристические методы, применяемые в этой концепции, одновременно определяют, какому коммивояжёру назначить конкретную задачу и в каком порядке эта задача будет выполняться в рамках маршрута выбранного коммивояжёра.

Концепция одновременной оптимизации включает множество методов, которые можно разделить на несколько подходов: детерминированные, метаэвристические, рыночные и другие. Например, в работе [1] задача МКВ с неоднородными транспортными средствами была решена с использованием точного алгоритма. Авторы сначала предложили формулировку задачи в виде целочисленного линейного программирования ILP , а затем разработали адаптивный алгоритм ветвления и границ, который позволил найти субоптимальное решение за 300 секунд для примера с 100 целями и 5 транспортными средствами. В другом исследовании [2] для оптимального решения МКВ использовалось программирование с ограничениями CP , включающее глобальные ограничения, интервальные переменные и алгоритмы фильтрации доменов. Однако этот подход оказался вычислительно затратный, так как время решения превысило два часа для примера с 51 городом и 3 коммивояжёрами.

Авторы [3, 4] предложили решения МКВ с использованием генетического алгоритма, они сравнили шесть различных операторов кроссовера, а именно циклический кроссовер CX , частично согласованный кроссовер, упорядоченный кроссовер OX , кроссовер рекомбинации ребер E X , кроссовер с чередованием позиций AEX , последовательный конструктивный кроссовер SCX .

Авторы в [5] смоделировали задачу целераспределения для нескольких беспилотных подводных аппаратов как МКВ. Решение направлено на минимизацию общего пройденного расстояния и общего угла поворота, что приводит к минимизации энергопотребления аппаратов. Предлагаемое решение состоит из двух этапов. Во-первых, решение определяет количество целей, которые будут назначены каждому аппарату. Затем для решения многокритериальной МКВ был использован предложенный метод Multiple Ant Colonies System MACS . Экспериментальные результаты доказали, что предлагаемая система превосходит классическую систему ACO.

Отмечено, что концепция, основанная на оптимизации, способна найти оптимальное решение, но с большими временными затратами.

Вторая концепция предполагает двухэтапный подход к решению МКВ. На первом этапе города распределяются между коммивояжёрами этап кластеризации . На втором этапе для каждого коммивояжёра определяется оптимальный порядок посещения городов, чтобы минимизировать заданный критерий качества.

Таким образом, данная концепция разбивает задачу МКВ на несколько отдельных задач коммивояжёра KB , используя методы кластеризации для сокращения пространства поиска решений [6–8]. Во многих работах предлагается двухэтапный подход для повышения эффективности эвристических алгоритмов при решении крупномасштабных задач МКВ. Одним из первых исследований, предложивших использование методов кластеризации для решения МКВ, стала работа авторов [9]. Они применили схему аттрактора соседства в сочетании с различными эвристическими алгоритмами, включая алгоритм сжатия и методы эволюционных вычислений. Полученные комбинации были протестированы на

трёх различных задачах, и результаты положили начало новому направлению в исследованиях МКВ. С тех пор в ряде работ были разработаны подходы, объединяющие алгоритмы кластеризации с одним или несколькими эвристическими методами оптимизации.

Обнаружено, что концепция CF S существенно уменьшает время расчета решения за счет разделения задач на несколько более простых задач, однако, данная концепция не имеет конкретного механизма оптимизации решения по критерию MinMax.

Третья концепция решения задачи множественных коммивояжеров МКВ предполагает следующий подход: сначала определяется порядок посещения всех городов, что формирует единый маршрут, охватывающий все города задачи так называемый "супер-маршрут". Затем этот супер-маршрут разделяется между коммивояжерами без изменения последовательности обхода городов. Таким образом, задача МКВ сводится к задаче одного коммивояжера. Данная концепция известна в литературе как route First-Cluster Second (RFCS) [10–12] и изначально применялась для решения задач маршрутизации транспортных средств, которые, в отличие от МКВ, учитывают вместимость и грузоподъемность агентов коммивояжеров.

Автор работы [13] использовал алгоритм Беллмана для направленных ациклических графов, чтобы разделить супер-маршрут. В упрощенном виде алгоритм работает следующим образом: два вложенных цикла, индексированные как i и j , проверяют каждую подпоследовательность городов $T_i, T_{i+1}, \dots, T_j$ и вычисляют её общую загрузку и стоимость поездки. Если подпоследовательность превышает пропускную способность транспортного средства, она исключается из рассмотрения. Стоит отметить, что концепция, основанная на оптимизации, хотя и способна находить оптимальные решения, требует значительных временных затрат, что ограничивает её применение для задач большого масштаба.

Выявлено, что концепция FCS имеет более гибкий механизм оптимизации решения по критерию MinMax, но за счет больших временных затрат, так как задача МКВ сводится к задаче KB, следовательно, размер пространства решения составляет $(n-1)!$, где n – количество городов МКВ.

В результате проведенного обзора было выявлено, что концепция route-First, Cluster-Second с предложенной модификацией для решения много-агентной задачи коммивояжера дает наилучший результат по самому длинному маршруту среди коммивояжеров, что способствует более сбалансированной нагрузке между агентами. Однако, она является слишком время-затратной по сравнению с концепцией Cluster-First, Route-Second, это в связи с тем, что муравьиный алгоритм в концепции route-First, Cluster-Second пытается найти умеренное решение в пространстве с размером $(n-1)!$ решений, что намного больше, чем размер пространства решений при использовании концепции Cluster-First, Route-Second, который составляет $n/m!$. При равномерном распределении n задач между m коммивояжерами.

Чем больше размер пространства решений, тем меньше вероятности того, что муравьиный алгоритм найдёт оптимальное решение, и тем меньше вероятность попадания в локальный минимум, в результате чего, метод концепции route-First, Cluster-Second работает дольше по времени.

В этой связи, предлагается гибридный метод, объединяющий обе концепции route-First, Cluster-Second и Cluster-First, Route-Second с тем, чтобы получить их позитивные аспекты и избавиться от их слабостей.

Концепция Cluster, Route, Connect, Split. Гибридный подход к решению МКВ, который объединяет идеи двух известных концепций: "Сначала кластеризация, затем маршрутизация" Cluster-First, Route-Second и "Сначала маршрутизация, затем кластеризация" route-First, Cluster-Second).

Метод состоит из следующих четырех основных этапов:

- ◆ Cluster Кластеризация: задачи города делятся на кластеры. Цель – распределить точки таким образом, чтобы минимизировать размера пространства решений. Для реализации данного этапа используется алгоритм K-Means [14] с указанным количеством кластеров 4 поскольку установлено, что это хорошее приближение к оптимальному компромиссу между временем расчета и качеством решения.

♦ **oute** Маршрутизация : для каждого кластера строится оптимальный маршрут с использованием методов, таких как муравьиный алгоритм [15]. Это обеспечивает предварительную оптимизацию маршрутов внутри каждого кластера.

♦ **Connect** Соединение : После кластеризации и решения задачи маршрутизации в каждом кластере нужно объединить эти под-маршруты в один маршрут, для этого нужно определить два узла из каждого кластера для соединения с остальными кластерами. Для определения этих узлов предлагается исследовать следующую эвристику: определить самые ближайшие два узла в потенциальных соседних кластерах.

♦ **Split** Разделение : Полученный супермаршрут разбивается на подмаршруты, каждый из которых присоединяется к городу-депо и закрепляется за конкретным коммивояжером. В процессе учитываются ограничения, такие как максимальная длина маршрута, балансировка нагрузки и времени выполнения. Детальное описание алгоритма разделения маршрута можно найти в работе [16].

Суть предложенного метода заключается в том, чтобы объединить преимущество концепции Cluster-First, Route-Second в разделении задачи на несколько подзадач, что уменьшает в итоге размер пространства решений и, следовательно, время расчета, с преимуществом концепции **oute-First, Cluster-Second** в минимизации максимального по длине маршрута среди коммивояжеров.

Моделирование. Для исследования предлагаемого метода и проведения сравнительного анализа его производительности с методами CF S и RFCS были взяты за основу 3 задачи из соответствующей библиотеки эталонных задач коммивояжера [17] *eil51*, *kroA100*, и *kroA150* с 51, 100 и 150 городами, соответственно. Для каждой из этих задач были поставлены 3 сценария с 3, 5 и 10 коммивояжерами. Каждый сценарий был запущен 100 раз для получения соответствующей представительной выборки.

Концепция Cluster-First, **oute Second** CF S : в качестве примера этой концепции рассмотрена работа Латаха [18] KM-CACO . В этом исследовании авторы сначала используют алгоритм K-Means для кластеризации городов, где количество кластеров равно числу коммивояжеров. Затем для каждого кластера применяется модифицированный муравьиный алгоритм ACO для поиска оптимального маршрута.

Концепция **oute-First, Cluster-Second** FCS : в качестве примера этой концепции рассмотрена работа [19] где предлагается решить задачу маршрутизации с помощью муравьиного алгоритма, и разделить маршрут между агентами таким образом, чтобы минимизировать дисбаланс нагрузки между агентами.

Критерии оценки производительности указанных алгоритмов были следующие:

- ♦ время расчета решения задачи мульти-коммивояжера;
- ♦ сумма пройденных коммивояжерами путей;
- ♦ максимальный по длине путь среди путей, пройденных коммивояжерами, для сравнения сбалансированности и равномерности распределения городов между коммивояжерами.

Коэффициент испарения феромона муравьиного алгоритма во всех сценариях составил 0.5. количество муравьев K составило n , а количество итерации не указано, Критерием завершения работы муравьиного алгоритма было повторение 20 итераций без повышения качества найденного решения. Такой выбор гиперпараметров муравьиного алгоритма был предложен в работе [20] как оптимальный для решения задачи коммивояжера.

Алгоритмы были запрограммированы на языке Python 3.8. Для моделирования использовался процессор Intel Core i7-9700KF CPU @ 3.60GHz AM 32GB, ОС Windows 10 Pro 64-bit.

Результаты и сравнительный анализ. Табл. 1, 2 и 3 последовательно представляют результаты решения задач *eil51*, *kroA100* и *kroA150* с 3, 5 и 10 коммивояжерами (m). В таблицах выражены: среднее среди 100 запусков по времени расчета решения в секундах (μ_t), сумма длин путей в метрах (μ_{sum}) и максимальная длина пути среди коммивояжеров в метрах (μ_{max}). Соответствующие оптимальные значения выделены жирным шрифтом.

Таблица 1

Результаты исследования задачи eil51

m	3			5			10		
метод	CFRS	RFCS	CRCS	CFRS	RFCS	CRCS	CFRS	RFCS	CRCS
μ_t	0.519	4.5	0.18	0.76	4.27	0.24	1.31	8.24	4.37
μ_{sum}	514.18	513.43	544.07	560.6	595.4	590.15	769.5	827.5	826.98
μ_{max}	190.87	177.43	187.1	133.33	127.08	126.61	99.78	93.16	93.1

Таблица 2

Результаты исследования задачи kroA100

m	3			5			10		
метод	CFRS	RFCS	CRCS	CFRS	RFCS	CRCS	CFRS	RFCS	CRCS
μ_t	2.11	37.52	1.43	3.41	38.47	1.58	6.1	49.38	12.33
μ_{sum}	28054	26855	27491.53	30658	32360	32433	40412	44391	45412
μ_{max}	11775	9233	9436.69	7916	7111	6903	5550	5417	5374

Таблица 3

Результаты исследования задачи kroA150

m	3			5			10		
метод	CFRS	RFCS	CRCS	CFRS	RFCS	CRCS	CFRS	RFCS	CRCS
μ_t	5.87	152.61	5.15	8.41	151.4	5.19	15.21	162.8	24.45
μ_{sum}	34671	32006	32728	36192	37146	37081	45507	49344	48983
μ_{max}	15355	11058	11309	8998	8002	7920	6169	5749	5701

На основании представленных в этих таблицах данных замечаем, что предлагаемый метод имеет преимущество по времени расчета для 3 и 5 агентов, и по критерию MinMax для 5 и 10 агентов.

Анализ полученных результатов расчета, представленных в указанных таблицах, показывает, что предложенный метод по сравнению с RFCS уменьшает время расчета на 88–2860%, а максимальная длина пути среди коммивояжеров уменьшается в среднем на 0.1–10% для задач с 5 и 10 агентами и увеличивает в среднем на 2–5 % для задач с 3 агентами.

Предложенный метод по сравнению с CFRS уменьшает время расчета на 12–68% для задач с 3 и 5 агентами и увеличивает в среднем на 60–233 % для задач с 10 агентами, а максимальная длина пути среди коммивояжеров уменьшается в среднем на 1–26%.

Заключение. В данной статье предлагается гибридный подход решения много-агентной задачи коммивояжера на основе уменьшения пространства решений. Проведено исследование предложенной методики на трех эталонных задачах коммивояжера с участием 3, 5, 10 агентов. Качество решения измерялось по 3 критериям: времени расчета решения, суммы расстояний маршрутов всех коммивояжеров, максимальной длины пути среди пройденных всеми агентами маршрутов. Результаты были сравнены с традиционными подходами решения МКВ на основе муравьиного алгоритма. Статистический анализ результатов показал, что в среднем, предложенный метод предлагает хороший компромисс между временем расчета и качеством решения.

В последующих публикациях мы намерены показать, каким образом рассмотренный в настоящей статье алгоритм решения задачи мульти коммивояжеров позволяет получить соответствующий оптимальный алгоритм по критерию минимума на множестве всех расстояний, проходимых коммивояжерами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00492 «Разработка методов оптимального целераспределения в группе подвижных робототехнических комплексов», <https://rscf.ru/project/24-29-00492/> на базе АО «НКБ Робототехники и систем управления».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sundar K., Rathinam S. Algorithms for heterogeneous, multiple depot, multiple unmanned vehicle path planning problems // *J. Intell. Robot. Syst., Theory Appl.* – 2017. – 88 (2–4). – P. 513-526. – <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-016-0458-5>.
2. Vali M., Salimifard K. A constraint programming approach for solving multiple traveling salesman problem // in: *The Sixteenth International Workshop on Constraint Modelling and Reformulation*. – 2017.
3. Shuai Y., Bradley S., Shoudong H., Dikai L. A new crossover approach for solving the multiple traveling salesman problem using genetic algorithms // *European J. Oper. Res.* – 2013. – P. 72-82.
4. Al-Omeir M.A., Ahmed Z.H. Comparative study of crossover operators for the mtsp // in: *2019 International Conference on Computer and Information Sciences (ICCIS), IEEE, 2019*. – P. 1-6.
5. Xu Z., Li Y., Feng X. Constrained multi-objective task assignment for UUVS using multiple ant colonies system // in: *2008 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management*. – 2008. – Vol. 1. – P. 462-466. – <http://dx.doi.org/10.1109/CCCM.2008.318>.
6. Shabanpour M., Yadollahi M., Hasani M.M. A New Method to Solve the Multi Traveling Salesman Problem with the Combination of Genetic Algorithm and Clustering Technique // *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. – May 2017. – Vol. 17, No. 5.
7. Basma H., Bashir H., Cheaitou A. A Novel Clustering Method for Breaking Down the Symmetric Multiple Traveling Salesman Problem // *Journal of Industrial Engineering and Management JIEM*. – 2021. – Vol. 14, No. 2.
8. Arthur D., Vassilvitskii S. K-Means++: The Advantages of careful seeding // *Proceedings of the 8th annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*. – 2007.
9. Sofge D., Schultz A., & De Jong K. Evolutionary computational approaches to solving the multiple traveling salesman problem using a neighborhood attractor schema // *Proceedings of the Applications of Evolutionary Computing on EvoWorkshops*. – 2002. – P. 153-162.
10. Beasley J.E. Route First - Cluster Second Methods for Vehicle Routing // *Omega*. – 1983. – Vol. 11, Issue 4. – P. 403-408.
11. Bozdemir M.K., Bozdemir M., Burcu Ö. Route First- Cluster Second Method for Personal Service Routing Problem // *Journal of Engineering Studies and Research*. – 2019. – Vol. 25, No. 2. – P. 18-24.
12. Houssein F.A., Kostyukov V.F. and Evdokimov I.D. A method for solving the multi-traveling salesman problem based on reducing the size of the solution space // *2024 10th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Vallette, Malta, 2024*. – P. 1729-1733. – DOI: 10.1109/CoDIT62066.2024.10708116.
13. Prins C. A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem // *Comput. Oper. Res.* – 2004. – 31. – P. 1985-2002.
14. Morissette Laurence & Chartier Sylvain. The k-means clustering technique: General considerations and implementation in Mathematica // *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology*. – 2013. – 9. – P. 15-24. – 10.20982/tqmp.09.1.p015.
15. Dorigo M., Birattari M., Stutzle T. Ant colony optimization // *IEEE Comput. Intell. Mag.* – 2006. – P. 28-39.
16. Хуссейн Ф.А. Разработка и исследование метода централизованного распределения задач в мультиагентных системах // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2024. – № 4.
17. Ruprecht-Karls. TSPLIB. Available online: <http://comopt.ifl.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95> (accessed on 4 August 2024).
18. Latah M. Solving multiple TSP problem by K-means and crossover based modified ACO algorithm // *International Journal of Engineering Research and Technology*. – 2016. – Vol. 5, No. 02.
19. Костюков В.А., Хуссейн Ф.А., Евдокимов И.Д. Метод решения проблемы мульти-коммивояжёра в среде без препятствий на основе уменьшения размера пространства решений // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2024. – № 1.
20. Dorigo M., Maniezzo V., & Colomi A. Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B*. – 1996. – 26 (1). – P. 29-41.

REFERENCES

1. Sundar K., Rathinam S. Algorithms for heterogeneous, multiple depot, multiple unmanned vehicle path planning problems, *J. Intell. Robot. Syst., Theory Appl.*, 2017, 88 (2–4), pp. 513-526. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-016-0458-5>.
2. Vali M., Salimifard K. A constraint programming approach for solving multiple traveling salesman problem, in: *The Sixteenth International Workshop on Constraint Modelling and Reformulation*, 2017.
3. Shuai Y., Bradley S., Shoudong H., Dikai L. A new crossover approach for solving the multiple traveling salesman problem using genetic algorithms, *European J. Oper. Res.*, 2013, pp. 72-82.

4. Al-Omeir M.A., Ahmed Z.H. Comparative study of crossover operators for the mtsp, in: *2019 International Conference on Computer and Information Sciences (ICCIS), IEEE, 2019*, pp. 1-6.
5. Xu Z., Li Y., Feng X. Constrained multi-objective task assignment for UUVS using multiple ant colonies system, in: *2008 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management, 2008*, Vol. 1, pp. 462-466. Available at: <http://dx.doi.org/10.1109/CCCM.2008.318>.
6. Shabanpour M., Yadollahi M., Hasani M.M. A New Method to Solve the Multi Traveling Salesman Problem with the Combination of Genetic Algorithm and Clustering Technique // *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. – May 2017. – Vol. 17, No. 5.
7. Basma H., Bashir H., Cheaitou A. A Novel Clustering Method for Breaking Down the Symmetric Multiple Traveling Salesman Problem, *Journal of Industrial Engineering and Management JIEM*, 2021, Vol. 14, No. 2.
8. Arthur D., Vassilvitskii S. K-Means++: The Advantages of careful seeding, *Proceedings of the 8th annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*, 2007.
9. Sofge D., Schultz A., & De Jong K. Evolutionary computational approaches to solving the multiple traveling salesman problem using a neighborhood attractor schema, *Proceedings of the Applications of Evolutionary Computing on EvoWorkshops*, 2002, pp. 153-162.
10. Beasley J.E. Route First - Cluster Second Methods for Vehicle Routing, *Omega*, 1983, Vol. 11, Issue 4, pp. 403-408.
11. Bozdemir M.K., Bozdemir M., Burcu Ö. Route First- Cluster Second Method for Personal Service Routing Problem, *Journal of Engineering Studies and Research*, 2019, Vol. 25, No. 2, pp. 18-24.
12. Houssein F.A., Kostyukov V.F. and Evdokimov I.D. A method for solving the multi-traveling salesman problem based on reducing the size of the solution space, *2024 10th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Vallette, Malta, 2024*, pp. 1729-1733. – DOI: 10.1109/CoDIT62066.2024.10708116.
13. Prins C. A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem, *Comput. Oper. Res.*, 2004, 31, pp. 1985-2002.
14. Morissette Laurence & Chartier Sylvain. The k-means clustering technique: General considerations and implementation in Mathematica, *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology*, 2013, 9, pp. 15-24. – 10.20982/tqmp.09.1.p015.
15. Dorigo M., Birattari M., Stutzle T. Ant colony optimization, *IEEE Comput. Intell. Mag.*, 2006, pp. 28-39.
16. Khusseyn F.A. Razrabotka i issledovanie metoda tsentralizovannogo raspredeleniya zadach v mul'tiagentnykh sistemakh [Development and study of the method of centralized distribution of tasks in multi-agent systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 4.
17. Ruprecht-Karls. TSPLIB. Available online: <http://comopt.ifl.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95> (accessed on 4 August 2024).
18. Latah M. Solving multiple TSP problem by K-means and crossover based modified ACO algorithm, *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2016, Vol. 5, No. 02.
19. Kostyukov V.A., Khusseyn F.A., Evdokimov I.D. Metod resheniya problemy mul'ti-kommivoyazhera v srede bez prepyatstviy na osnove umen'sheniya razmera prostranstva resheniy [Method for solving the multi-traveling salesman problem in an obstacle-free environment based on reducing the size of the solution space], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 1.
20. Dorigo M., Maniezzo V., & Colnani A. Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B*, 1996, 26 (1), pp. 29-41.

Костюков Владимир Александрович – АО «НКБ Робототехники и систем управления»; e-mail: wkost-einheit@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; к.т.н.; научный руководитель.

Хуссейн Фирас Айманович – АО «НКБ Робототехники и систем управления»; e-mail: firmas94mecha@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 89996379357; м.н.с.

Kostyukov Vladimir Aleksandrovich – Joint-Stock Company “o botics and Control Systems”; e-mail: wkost-einheit@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694; can. of eng. sc.; senior researcher.

Houssein Firas Aimanovich – Joint-Stock Company “o botics and Control Systems”; e-mail: firmas94mecha@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79996379357; junior researcher.

Раздел III. Связь, навигация и наведение

УДК 621.391.81:004.056.55:004.89

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-202-211

В.А. Головской, А.В. Винокуров

МОДЕЛЬ ПОДСИСТЕМЫ ВЫРАБОТКИ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ КЛЮЧЕЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Исследование посвящено совершенствованию подсистемы защиты информации в радиоканалах киберфизической системы на примере робототехнического комплекса (РТК). Рассмотрены современные и перспективные критические условия применения РТК, обуславливающие наборы требований к характеристикам как РТК, так и их подсистем, таким как радиосистема передачи данных (РС) и подсистема защиты информации. Одним из подходов к выполнению требований является унификация указанных подсистем РТК, которая может быть разделена условно на две научно-технические задачи: унификация радиопrotocolов и унификация средств защиты информации в радиоканалах РС. В работе представлены полученные в результате анализа практические проблемы, лежащие на пересечении двух областей исследования – РС и подсистем защиты информации. Сформулирована гипотеза о потенциальной возможности эффективного разрешения одной из указанных практических проблем – обеспечения системы защиты информации криптографическими ключами – путем включения в систему защиты информации РТК подсистемы выработки криптографических ключей (ПВКК) из используемых в качестве исходной ключевой информации биометрических данных. Предлагаемое усовершенствование имеет несколько аспектов – нормативный, экономический, технический. В работе исследуется только научно-техническая сторона вопроса, в результате чего предложена функциональная модель ПВКК. Целью работы является разработка модели функционирования ПВКК для системы криптографической защиты информации в радиоканалах РС РТК и формирование её алгоритмического наполнения. Объект исследования – система криптографической защиты информации в радиоканалах РС. Предмет исследований – алгоритм выработки криптографических ключей для системы криптографической защиты информации в радиоканалах РС РТК. Для достижения цели обоснован класс привлекаемых абстракций и методический аппарат, использующий положения теории алгоритмов для доказательства существования алгоритма, разрешающего сформулированную массовую проблему и обладающего заданными нетривиальными семантическими свойствами. Методы исследования – анализ, аналогия, синтез, декомпозиция, абстрагирование. Сформулирована основная массовая проблема и гипотеза о её разрешимости. С целью проверки гипотезы сформулирована и доказана соответствующая теорема. Предложенная модель обеспечивает исследования возможностей моделируемой подсистемы по реализации сформулированных принципов функционирования и позволяет доказывать совместную эффективную реализуемость различных алгоритмов обработки информации.

Алгоритм; безопасность информации; биометрические данные; биометрия; защита информации; информационный конфликт; киберфизическая система; криптографический ключ; массовая проблема; модель; радиосистема; робототехнический комплекс.

V.A. Golovskoy, A.V. Vinokurov

A MODEL OF A SUBSYSTEM FOR GENERATING CRYPTOGRAPHIC KEYS OF THE CYBERPHYSICAL SYSTEM INFORMATION PROTECTION SYSTEM

The study is devoted to improving the subsystem of information protection in the radio channels of a cyberphysical system using the example of a robotic complex (RTC). Modern and promising critical conditions for the use of RTCs are considered, which determine the sets of requirements for the characteristics of both RTCs and their subsystems, such as the radio data transmission system (RS) and the information security subsystem. One of the approaches to meeting the requirements is the unification of these

RTC subsystems, which can be divided conditionally into two scientific and technical tasks: unification of radio protocols and unification of information security tools in RS radio channels. The paper presents the practical problems obtained as a result of the analysis, which lie at the intersection of two areas of research – RS and information security subsystems. A hypothesis has been formed about the potential for effective resolution of one of these practical problems – providing an information protection system with cryptographic keys - by including a cryptographic key generation subsystem (CKGS) from biometric data used as the initial key information in the RTC information protection system. The proposed improvement has several aspects – regulatory, economic, and technical. The paper examines only the scientific and technical side of the issue, as a result of which a functional model of the CKGS is proposed, which provides a study of the possibilities of the modeled subsystem for the implementation of the formulated principles of functioning. The purpose of the work is to develop a model of the CKGS functioning for the cryptographic information protection system in the RS RTC radio channels and the formation of its algorithmic content. The object of research is a system of cryptographic information protection in RS radio channels. The subject of the research is an algorithm for generating cryptographic keys for a cryptographic information protection system in RS RTC radio channels. To achieve this goal, a class of abstractions involved and a methodological apparatus are substantiated that uses the provisions of the theory of algorithms to prove the existence of an algorithm that solves a formulated mass problem and has specified non-trivial semantic properties. Research methods – analysis, analogy, synthesis, decomposition, abstraction. The main mass problem and the hypothesis of its solvability are formulated. In order to test the hypothesis, the corresponding theorem is formulated and proved. The proposed model makes it possible to prove the joint effective feasibility of various information processing algorithms.

Algorithm; information security; biometric data; biometrics; information protection; information conflict; cyberphysical system; cryptographic key; mass problem; model; radio system; robotics complex.

Введение. Возросшая доступность вычислительных возможностей обусловила наблюдаемый в настоящее время резкий рост количества сфер применения автономных технических систем и являющихся их развитием интеллектуальных киберфизических систем (КФС) [1–3]. Примером КФС могут служить интеллектуальные транспортные системы [4] или робототехнические комплексы (РТК) [3, 5], функционирующие в критических условиях или с прогнозируемо критическими последствиями. Развитие способностей КФС обусловило прогресс в конструировании техник атак на их информационные ресурсы [6]. В случае, когда указанные выше системы относятся к системам реального времени, появляются новые задачи в обеспечении информационной безопасности их ресурсов [7], что дополнительно осложняется жесткими требованиями к массо-габаритным и энергетическим характеристикам КФС и их подсистем.

Дополнительную остроту проблеме защиты информации в КФС придает тенденция к расширению спектра задач, выполняемых представителем их класса – РТК. Анализ литературы [8–10] и практика позволяют констатировать, что в настоящее время имеют место следующие особенности разработки РТК:

- ♦ технологическое несовершенство предприятий промышленности РФ, проявляющаяся, в том числе, в ограниченности номенклатуры и характеристиках выпускаемых вычислительных средств и телекоммуникационного оборудования;
- ♦ наличие жестких ресурсных ограничений (энергетических, структурных и др.), обусловленных требуемой автономностью РТК;
- ♦ высокая степень интеграции ресурсов РТК;
- ♦ ужесточение требований практики по сокращению сроков разработки РТК и поставки их конечному пользователю;
- ♦ пересмотр подходов к содержанию и длительности этапов жизненного цикла РТК – эксплуатация может длиться ничтожное время относительно прочих этапов.

Последний фактор в совокупности с условиями эксплуатации обуславливают необходимость пересмотра [10, 11] существующих подходов к формированию требований к подсистемам РТК, в частности – к подсистеме защиты информации. Указанная необходимость является одним из аспектов проблемы унификации разрозненных радиосистем передачи данных (РС) РТК [10, 11], являющейся известной и актуальной не только применительно к радиосистемам [12]. При этом решение проблемы унификации должно обеспечить построение единой, но гибкой и модульной эффективной РС РТК.

Постановка задачи. Несмотря на наличие системы взглядов на разработку специальной техники, приведенные выше аргументы, результаты исследований [10–14] и практика обуславливают следующие аспекты, вынуждающие рассматривать вопросы информационной безопасности ресурсов РТК с новых позиций:

требование минимизации стоимости подсистем РТК;

- ♦ требование наличия штатной схемы автономного уничтожения носителей информации и целых подсистем защиты информации;
- ♦ малое время, в течение которого подлежащая защите информация, циркулирующая в радиоканалах РС, является ценной;
- ♦ возникновение новых угроз, таких как атаки на модели обучения;
- ♦ наличие проблемы обеспечения средств криптографической защиты информации (СКЗИ) криптографическими ключами (КК).

Последняя проблема, являющаяся известной [15] и сугубо практической, обострилась в последние годы в связи с увеличением доли РТК, в радиоканалах РС которых информация подлежит защите, и их особенностями функционирования, не обеспечивающими возможность получить и использовать новые КК взамен скомпрометированных или с истекшим сроком действия. Под КК согласно [16] понимается совокупность данных, обеспечивающая выбор одного конкретного криптографического преобразования из числа всех возможных в данной криптографической системе.

Рассмотренные выше факторы обуславливают принятую в настоящей статье степень детализации РТК, из которого выделен объект исследования – система криптографической защиты информации (КЗИ) в радиоканалах РС. Под РТК в работе понимается КФС, состоящая из следующих подсистем:

- ♦ группа робототехнических средств (РТС);
- ♦ РС и подсистемы обеспечения, выделяемые на логическом уровне.

При наличии в составе РТК пункта управления, реализующего функции обработки информации и управления РТС оператором, такой РТК будет относиться к социкиберфизическим системам [17].

Из множества направлений исследований в области КЗИ для обозначенного объекта исследований наиболее актуальны следующие:

- ♦ низкоресурсная криптография [18];
- ♦ обеспечение стойкости криптоалгоритмов при минимизации длины КК [15];
- ♦ личностное шифрование [19].

Вопросы низкоресурсной криптографии и минимизации длины КК активно исследуются ввиду бурного развития развития облачных технологий и интернета вещей [13, 18, 20, 21]. Лежащая в основе личностного шифрования идея использования биометрических данных (БмД) для применения в системах КЗИ не нова [22], однако в лишь недавно на практике стала возможна реализация ее с требуемым качеством [18, 21], ввиду чего БмД рассматриваются как источник уникальных данных для решения различных практических задач [19, 23–27], в том числе задач защиты информации. Важным вопросом в современной криптографии является выбор алгоритмической проблемы [28] для формирования на ее основании КК. В работе [19] был предложен протокол личностного шифрования, предполагающий формирование КК для асимметричной криптосистемы из БмД, а также проведен его анализ с позиций безопасности. Однако применение асимметричных криптосистем для рассматриваемого класса КФС не может быть осуществлено по ряду известных причин. Анализ приведенных выше проблем, особенностей и аргументов позволил сформулировать гипотезу: алгоритмическая проблема разрешимости множества точек, являющегося отображением конкретного набора БмД операторов социкиберфизических систем, может быть использована как основание для построения подсистемы выработки КК (ПВКК) для системы КЗИ унифицированной РС РТК.

Настоящая статья является продолжением исследований по формированию системы подходов к построению унифицированной РС РТК [9, 11], и имеет целью разработать модель функционирования ПВКК для системы КЗИ в радиоканалах РС РТК и сформировать её алгоритмическое наполнение. В качестве предмета исследований определен алгоритм выработки КК для системы КЗИ в радиоканалах РС РТК.

С учетом приведенных формальных элементов исследования сформулированы следующие ограничения, позволяющие абстрагироваться от некоторых важных проблем обеспечения ИБ ресурсов РТК, являющихся предметом других исследований [10, 11, 29]:

- ♦ рассматривается применение СКЗИ непосредственно и только для обеспечения конфиденциальности передаваемой в радиоканалах информации;
- ♦ не рассматриваются вопросы аутентификации абонентов, разграничения прав доступа и прочие;
- ♦ по радиоканалам передается информация, не содержащая сведений, составляющих государственную тайну;
- ♦ рассматривается наличие только внешнего нарушителя;
- ♦ акцент делается на научно-технических аспектах проблемы, и не берутся во внимание правовые, обусловленные существующими требованиями регуляторов.

Формирование модели. Предлагается к рассмотрению разработанная функциональная модель ПВКК, формализованная с использованием нотации IDEF0. Рис. 1 иллюстрирует первый уровень описания функциональной модели ПВКК. В качестве входа предлагается рассматривать набор символов $f_i \in F$, являющийся инъективным отображением набора БмД выбранного субъекта.

Управление реализуется на основе:

- ♦ введенного ранее множества образов F , являющихся отображением БмД;
- ♦ требований к информативным наборам признаков P ;
- ♦ требований к набору тестов на случайность R ;
- ♦ требуемой длины КК L . При этом предполагается, что подсистема КЗИ поддерживает возможность изменять по требованию размер КК, что обеспечит возможность генерирования КК для различных типов СКЗИ.

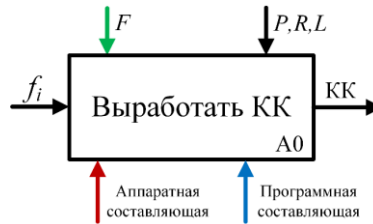


Рис. 1. Функциональная модель ПВКК

Результатом функционирования предлагаемой ПВКК является выработанный ею КК, предназначенный для введения в загрузчик ключей СКЗИ в составе системы ЗИ КФС. База лиц F представляет собой множество разрешенных образов – наборов БмД определенных субъектов, при этом для F предусмотрена возможность оперативного изменения ее содержания.

На рис. 2 представлен результат декомпозиции блока А0 контекстной диаграммы, приведенной на рис. 1. Предлагаемая схема позволяет получить более полное представление о принципах функционирования ПВКК.

Гипотеза: ПВКК со способностями, соответствующими функциональному наполнению блоков А1, А2, А3, А4, реализуема.

Для проверки гипотезы предлагается перейти от формализма функционального моделирования к формализмам теории алгоритмов, имеющим достаточную историю применения [30] при исследованиях проблем информационной безопасности. С учетом функциональной эквивалентности аппаратного и программного обеспечения абстрагируемся от его конкретного воплощения и будем на основании тезиса Тьюринга считать вычислительную систему реализуемой при существовании моделирующего ее работу алгоритма, формализованного любым из принятых в теории алгоритмов способов. Алгоритм предназначен для разрешения массовой или алгоритмической проблемы, формализуемой

своим языком L_{MP} – множеством слов, описывающими проблему [9, 14]. Используем следующие обозначения, принятые в теории алгоритмов: $A(x, y) = z$ – алгоритм A останавливается на входе x, y с результатом z ; запись $A_\alpha \circ A_\beta = A_\gamma$ обозначает, что A_γ является результатом последовательной композиции алгоритмов A_α и A_β . Далее в целях сокращения объема статьи примем, что все входы и выходы алгоритмов представляют собой слова, кодирующие определенные ранее соответствующие объекты, т.е. вместо традиционной записи $code(L)$ будем писать L , подразумевая $code(L)$, и т.д. Принятые обозначения позволяют сформулировать алгоритмическую проблему P_{KK} , отражающую задачу рассмотренной выше модели, формализуемую языком

$$L_{KK} = \left\{ (f_i, L, R, P)_g, k_i \right\}, g = \overline{1, N_G}, \quad (1)$$

где k_i – КК с номером i , $i = \overline{1, N_I}$.

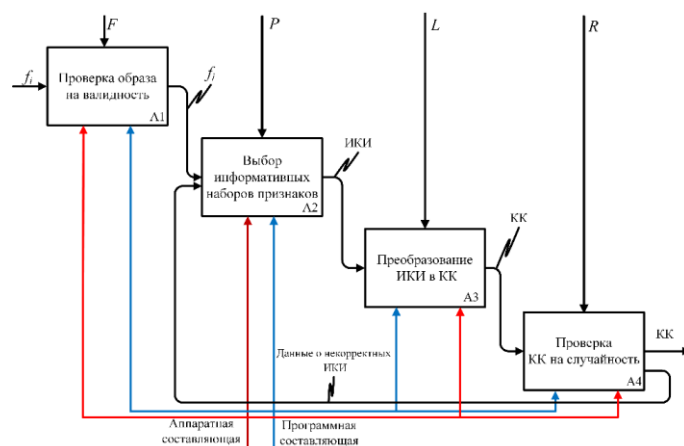


Рис. 2. Второй уровень функциональной модели ПВКК

Разрешимость L_{KK} будет означать, что существует алгоритм $A^0(f_i, L, R, P)_g = k_i$, ставящий в однозначное соответствие каждому входу $(f_i, L, R, P)_g$ конкретный КК k_i . Следует отметить, что набор (L, R, P) , являющийся элементом управления модели на рис. 1 и 2, помещен в часть языка (1), подаваемую на вход A^0 , по причине перехода от абстракций функционального моделирования к теоретико-алгоритмическим, предполагающим, что управляющие инструкции могут содержаться только в самом алгоритме или в его входе. С целью проверки выдвинутой гипотезы сформулирована следующая **теорема**: массовая проблема выработки КК, формализуемая языком L_{KK} , разрешима алгоритмом с нетривиальными семантическими свойствами, соответствующими функциональному наполнению блоков $A1, A2, A3, A4$.

Доказательство теоремы. Рассмотрим предлагаемое алгоритмическое содержание представленных блоков второго уровня функциональной модели, что обеспечит переход от использования методологии IDEF0 к теоретико-алгоритмическому описанию моделируемых процессов. Указанный переход, обоснованный в [14], согласуется с положениями системного подхода к построению и исследованию моделей. Для осуществления перехода поставим в соответствие каждому блоку A_i модели, приведенной на рис. 2, реализующий его функционал алгоритм A^i , т.е. зададим отображение $A_i \xrightarrow{M} A^i$.

В блоке A1 осуществляется проверка поступившего на вход ПВКК образа f_i на принадлежность F , т.е. реализуется разрешающий конечное множество F алгоритм

$$A^1(f_i) = \begin{cases} f_i, & \text{если } f_i \in F; \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases}$$

являющийся по сути алгоритмом, разрешающим известную массовую проблему сравнения двух слов в конечном их множестве.

При получении $A^1(f_i) = 0$ функционирование ПВКК останавливается по недопуску слова, соответствующего набору БмД f_i .

Следует отметить, что в рассматриваемой модели не отражен важный [31] вопрос качества получаемого на вход блока A1 образа f_i , при решении которого применительно к рассматриваемому классу КФС необходимо учитывать ограниченность ресурсов.

В блоке A2 из поступившего на вход набора f_i осуществляется выбор информативных признаков на основе P , т.е. вычисление слова p_i алгоритмом вида

$$A^2(f_i, P) = p_i.$$

Указанное действие необходимо для выбора из f_i набора уникальных признаков, способных обеспечить выработку на их основе множества КК, удовлетворяющих заданным требованиям безопасности. Таким образом, на выход блока A2 поступает информативный набор БмД в виде слова p_i , полученный путем обработки f_i , и представляющий собой исходную ключевую информацию (ИКИ), под которой понимается совокупность данных, предназначенных для выработки из них по определенным правилам КК [16].

Блок A3 иллюстрирует этап выработки КК требуемой длины L из ИКИ p_i , поступившей из Блока A2, т.е. вычисление

$$A^3(p_i, L) = k_i,$$

где $k_i \in \{1, 0\}^+$, $|k_i| = L$.

Блок A4 иллюстрирует необходимый этап проверки выработанного КК на случайность с учетом множества доступных для ПВКК алгоритмов тестирования $T = \{\Theta_p\}$, $p = \overline{1, N_p}$, системы C правил определения количества N_r и выбора тестов из T , определяющих своей совокупностью $R = \langle N_r, T, C \rangle$. Система тестирования будет реализовываться последовательным выполнением в отношении k_i , вычисленного A^3 , r алгоритмов тестирования, рассмотренных подробно в [32],

$$\Theta_r(k_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } k_i \text{ прошел } r\text{-й тест;} \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

Проверка КК на случайность, являющаяся наполнением A4, будет реализовываться следующим алгоритмом:

$$A^4(k_i, \Theta_r) = \begin{cases} k_i, & \text{если } \bigcap_{r_j}^{| \Theta_r |} \Theta_r(k_i) = 1; \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

Рассмотренные алгоритмы позволяют сделать вывод о том, что моделирующий функционирование ПВКК алгоритм $A(f_i, L, R, P) = k_i$ может быть представлен как композиция уже рассмотренных

$$A^0 = A^1 \circ A^2 \circ A^3 \circ A^4,$$

что, в свою очередь, позволяет делать вывод о разрешимости P_{KK} с языком (1). $\square$

Выводы. Изложенные в работе предложения могут рассматриваться в качестве одного из направлений исследований по унификации СКЗИ РТК и являющихся их обобщением – КФС. Однако для этого, кроме исследований в области технологий, необходимо изменение существующей системы взглядов регуляторов на выработку КК, разработку СКЗИ и обращение с ними. Продолжение исследования видится в решении актуальной проблемы выбора оптимального набора средств защиты информации [11], учитывающего рассмотренные выше особенности применения РТК и вопросы информационной безопасности их ресурсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wang X., Guo Y., Gao Y. Unmanned Autonomous Intelligent System in 6G Non-Terrestrial Network // Information. – 2024. – Vol. 15, No. 1:38. – URL: <https://doi.org/10.3390/info15010038>.
2. Science & Technology Trends 2023-2043. Overview. NATO Science & Technology Organization. – URL: <https://cesmar.it/wp-content/uploads/2023/04/stt23-vol1.pdf>.
3. Honey D.A. Trusted AI and autonomy for today's warfighter // Autonomous Systems: Sensors, Processing, and Security for Ground, Air, Sea, and Space Vehicles and Infrastructure 2024. – SPIE, 2024. – Vol. 13052. – P. 130520E.
4. Chafii M., Bariah L., Muhaidat S., Debbah M. Twelve Scientific Challenges for 6G: Rethinking the Foundations of Communications Theory // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2023. – Vol. 25, Issue 2. – P. 868-904.
5. Blakcori N., Stathakis L.I., Koutsoukos L.D., Kirilov L.K. The Evolving UAS Threat: Lessons from the Russian-Ukrainian War Since 2022 on Future Air Defence Challenges and Requirements // NATO, Integrated Air and Missile Defence Center of Excellence. – 2024. – 18 p.
6. Турдаков Д.Ю., Аветисян А.И., Архипенко К.В., Анциферова А.В., Ватолин Д.С., Волков С.С., Гасников А.В. и др. Доверенный Искусственный интеллект: вызовы и перспективные решения // Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления. – 2022. – Т. 508, №1. – С. 13-18.
7. Pavlenko E.Y., Vasileva K.V., Lavrova D.S., Zegzhda D.P. Counteraction the cybersecurity threats of the in-vehicle local network // Journal of Computer Virology and Hacking Techniques. – 2023. – Vol. 19, No. 3. – P. 399-408.
8. Головенкин А.С. Проблема ограниченности ресурсов в обеспечении экономической безопасности предприятий оборонно-промышленного комплекса // Вестник евразийской науки. – 2024. – Т. 16, № S1.
9. Головской В.А. Операционная модель когнитивной радиосистемы робототехнического комплекса // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2024. – Т. 18, № 5. – С. 12-20.
10. Бирюков П.А., Тимохин А.А., Макаренко С.И. Бригады сухопутных войск, вооруженные беспилотными летательными аппаратами: обоснование создания, предложения по их структуре, способам боевого применения и техническому обеспечению с учетом опыта специальной военной операции на Украине // Системы управления, связи и безопасности. – 2024. – № 2. – С. 43-70.
11. Головской В.А. Алгоритмические аспекты проблемы оценивания достаточности средств защиты информации // Перспективы безопасности-2024: Сб. материалов II научно-технической конференции, посвященной информационной безопасности, Санкт-Петербург, 19–20 июня 2024 года. – СПб.: ООО «Специальный Технологический Центр», 2024. – С. 17-22.
12. Бочаров Н.А. Исследование подходов к унификации бортовых вычислительных комплексов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 1 (231). – С. 275-287.
13. Gnutow M.S., Sizonenko A.B., Gnutow S.K. Optimization of Resource Utilization of Distributed Automated Systems Under the Influence of Heterogeneous Security Threats // Proceedings of the 2nd 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2020, Moscow, 12–14.03.2020. – Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 9059180.
14. Головской В.А. Анализ проблематики прогнозирования поведения когнитивных радиосистем // Радиотехника. – 2024. – Т. 88, № 12. – С. 134-145.
15. Молдовян Н.А., Горячев А.А., Муравьев А.В. Протокол стойкого шифрования по ключу малого размера // Вопросы защиты информации. – 2015. – № 1 (108). – С. 3-8.
16. МР 26.2.006-2021. Методические рекомендации «Информационная технология. Криптографическая защита информации. Термины и определения». Технический комитет по стандартизации ТК 26 «Криптографическая защита информации». – М., 2021. – 87 с.

17. Микони С.В. Методика построения многоуровневой модели оценивания сложного объекта // *Онтология проектирования*. – 2022. – Т. 12, № 3 (45). – С. 380-392.
18. Pham H.L., Trung Duong Le V., Duy Tran V., Hai Vu T., Nakashima Y. LiCryptor: High-Speed and Compact Multi-Grained Reconfigurable Accelerator for Lightweight Cryptography // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. – 2024. – Vol. 71, No. 10. – P. 4624-4637.
19. Поляков А.В. Биометрическое личностное шифрование // *Интеллектуальные системы. Теория и приложения*. – 2017. – Т. 21, № 1. – С. 149-163.
20. Бабенко Л.К., Русаловский И.Д. Разработка операций для алгоритмов гомоморфного шифрования // *Вопросы кибербезопасности*. – 2024. – № 2 (60). – С. 101-106.
21. Duong Le V.T., Pham H.L., Duong T.S., Tran T.H., Nam Nguyen Q.D., Nakashima Y. RHCP: A Reconfigurable High-efficient Cryptographic Processor for Decentralized IoT Platforms // *2023 15th International Conference on Knowledge and Systems Engineering (KSE)*, Hanoi, Vietnam, 2023. – P. 1-6.
22. Shamir A. Identity-Based Cryptosystems and Signature Schemes // *Advances in Cryptology*. – 1985. – Vol. 196. – P. 47-53.
23. Куликов А.А. Применение биометрических систем в технологиях идентификации лиц // *Российский технологический журнал*. – 2021. – № 9 (3). – С. 7-14.
24. Mizinov P.V., Konnova N.S., Basarab M.A., Pleshakova E.S. Parametric study of hand dorsal vein biometric recognition vulnerability to spoofing attacks // *Journal of Computer Virology and Hacking Techniques*. – 2023. – Vol. 20. – P. 383-396.
25. Баянов Б.И. Метод квантования с линейным преобразованием биометрических данных динамического рукописного почерка // *Вестник технологического университета*. – 2023. – Т. 26, № 1. – С. 113-118.
26. Волчихин В.И., Иванов А.И., Иванов А.П. Алгоритм быстрого вычисления энтропии Шеннона на малых выборках для длинных кодов биометрии с существенно зависимыми разрядами // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. – 2024. – № 4. – С. 27-34.
27. Сулаво А.Е., Ложников П.С., Самотуга А.Е., Сулаво А.В., Стадников Д.Г., Чобан А.Г. Идентификационный потенциал электроэнцефалограмм в задачах информационной безопасности: монография. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2025. – 264 с.
28. Рыбалов А.Н. О генерической сложности проблемы дискретного логарифма в последовательностях Люка // *Прикладная дискретная математика*. – 2024. – № 66. – С. 116-122.
29. Куракин А.С. Модель разграничения прав доступа виртуального отряда беспилотных летательных аппаратов // *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы*. – 2022. – № 3. – С. 121-129.
30. Cohen F. Computational aspects of computer viruses // *Computers & Security*. – 1989. – Vol. 8, No. 4. – P. 297-298.
31. Schlett T., Rathgeb C., Henniger O., Galbally J., Fierrez J., Busch C. Face Image Quality Assessment: A Literature Survey // *ACM Computing Surveys (CSUR)*. – 2022. – Vol. 54, Issue 10s. – P. 1-49.
32. Иванов А.И. Нейросетевой многокритериальный статистический анализ малых выборок. Проверка гипотезы независимости. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2023. – 218 с.

REFERENCES

1. Wang X., Guo Y., Gao Y. Unmanned Autonomous Intelligent System in 6G Non-Terrestrial Network, *Information*, 2024, Vol. 15, No. 1:38. Available at: <https://doi.org/10.3390/info15010038>.
2. Science & Technology Trends 2023-2043. Overview. NATO Science & Technology Organization. Available at: <https://cesmar.it/wp-content/uploads/2023/04/stt23-vol1.pdf>.
3. Honey D.A. Trusted AI and autonomy for today's warfighter, *Autonomous Systems: Sensors, Processing, and Security for Ground, Air, Sea, and Space Vehicles and Infrastructure 2024*. SPIE, 2024, Vol. 13052, pp. 130520E.
4. Chafii M., Bariah L., Muhaidat S., Debbah M. Twelve Scientific Challenges for 6G: Rethinking the Foundations of Communications Theory, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2023, Vol. 25, Issue 2, pp. 868-904.
5. Blakcori N., Stathakis L.I., Koutsoukos L.D., Kirilov L.K. The Evolving UAS Threat: Lessons from the Russian-Ukrainian War Since 2022 on Future Air Defence Challenges and Requirements, *NATO, Integrated Air and Missile Defence Center of Excellence*, 2024, 18 p.
6. Turdakov D.Yu., Avetisyan A.I., Arkhipenko K.V., Antsiferova A.V., Vatolin D.S., Volkov S.S., Gasnikov A.V. i dr. Doverennyi Iskusstvennyy intellekt: vyzovy i perspektivnye resheniya [Trusted artificial intelligence: challenges and promising solutions], *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Matematika, informatika, protsessy upravleniya* [Reports of the Russian Academy of Sciences. Mathematics, informatics, control processes], 2022, Vol. 508, No. 1, pp. 13-18.

7. Pavlenko E.Y., Vasileva K.V., Lavrova D.S., Zegzhda D.P. Counteraction the cybersecurity threats of the in-vehicle local network, *Journal of Computer Virology and Hacking Techniques*, 2023, Vol. 19, No. 3, pp. 399-408.
8. Golovenkin A.S. Problema ogranichennosti resursov v obespechenii ekonomicheskoy bezopasnosti predpriyatiy oboronno-promyshlennogo kompleksa [The problem of limited resources in ensuring the economic security of enterprises of the military-industrial complex], *Vestnik evraziyskoy nauki* [The Eurasian Scientific Journal], 2024, Vol. 16, № S1.
9. Golovskoy V.A. Operatsionnaya model' kognitivnoy radiosistemy robototekhnicheskogo kompleksa [An operational model of the cognitive radio system of a robotic complex], *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-Comm: Telecommunications and transport], 2024, Vol. 18, No. 5, pp. 12-20.
10. Biryukov P.A., Timokhin A.A., Makarenko S.I. Brigady sukhoputnykh voysk, vooruzhennyye bespilotnyimi letatel'nyimi apparatami: obosnovanie sozdaniya, predlozheniya po ikh strukture, sposobam boevogo primeneniya i tekhnicheskomu obespecheniyu s uchetom opyta spetsial'noy voennoy operatsii na Ukraine [Brigades of ground forces equipped with unmanned aerial vehicles: justification for their creation, proposals on their structure, methods of combat use and technical support, taking into account the experience of the special military operation in Ukraine], *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2024, No. 2, pp. 43-70.
11. Golovskoy V.A. Algoritmicheskie aspekty problemy otsenivaniya dostatochnosti sredstv zashchity informatsii [Algorithmic aspects of the problem of assessing the adequacy of information security tools], *Perspektivy bezopasnosti-2024: Sb. materialov II nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy informatsionnoy bezopasnosti, Sankt-Peterburg, 19–20 iyunya 2024 goda* [Security Prospects-2024: Proceedings of the II Scientific and Technical Conference on Information Security, St. Petersburg, June 19-20, 2024]. Saint Petersburg: OOO «Spetsial'nyy Tekhnologicheskiiy Tsentr», 2024, pp. 17-22.
12. Bocharov N.A. Issledovanie podkhodov k unifikatsii bortovykh vychislitel'nykh kompleksov [Study of approaches to the unification of on-board computers], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 1 (231), pp. 275-287.
13. Gnutow M.S., Sizonenko A.B., Gnutow S.K. Optimization of Resource Utilization of Distributed Automated Systems Under the Influence of Heterogeneous Security Threats, *Proceedings of the 2nd 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2020, Moscow, 12–14.03.2020*. Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020, pp. 9059180.
14. Golovskoy V.A. Analiz problematiki prognozirovaniya povedeniya kognitivnykh radiosistem [Analysis of the problems of predicting the behavior of cognitive radio systems], *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2024, Vol. 88, No. 12, pp. 134-145.
15. Moldovyan N.A., Goryachev A.A., Murav'ev A.V. Protokol stoykogo shifrovaniya po klyuchu malogo razmera [Protocol for secure encryption with using small-size key], *Voprosy zashchity informatsii* [Information security questions], 2015, No. 1 (108), pp. 3-8.
16. MR 26.2.006-2021. Metodicheskie rekomendatsii «Informatsionnaya tekhnologiya. Kriptograficheskaya zashchita informatsii. Terminy i opredeleniya». Tekhnicheskiiy komitet po standartizatsii TK 26 «Kriptograficheskaya zashchita informatsii» [MP 26.2.006-2021. Methodological recommendations «Information technology. Cryptographic protection of information. Terms and definitions». Technical Committee for Standardization «Cryptographic information Protection»]. Moscow, 2021, 87 p.
17. Mikoni S.V. Metodika postroeniya mnogourovnevnoy modeli otsenivaniya slozhnogo ob"ekta [Methodology for creating a multilevel model for evaluating a complex object], *Ontologiya proektirovaniya* [Ontology of designing], 2022, Vol. 12, No. 3 (45), pp. 380-392.
18. Pham H.L., Trung Duong Le V., Duy Tran V., Hai Vu T., Nakashima Y. LiCrytor: High-Speed and Compact Multi-Grained Reconfigurable Accelerator for Lightweight Cryptography, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2024, Vol. 71, No. 10, pp. 4624-4637.
19. Polyakov A.V. Biometricheskoe lichnostnoe shifrovanie [Biometric identity encryption], *Intellektual'nye sistemy. Teoriya i prilozheniya* [Intelligent systems. Theory and applications], 2017, Vol. 21, No. 1, pp.149-163.
20. Babenko L.K., Rusalovskiy I.D. Razrabotka operatsiy dlya algoritmov gomomorfnoy shifrovaniya [Development of operations for homomorphic encryption algorithms], *Voprosy kiberbezopasnosti* [Voprosy kiberbezopasnosti], 2024, No. 2 (60), pp. 101-106.
21. Duong Le V.T., Pham H.L., Duong T.S., Tran T.H., Nam Nguyen Q.D., Nakashima Y. RHCP: A Reconfigurable High-efficient Cryptographic Processor for Decentralized IoT Platforms, *2023 15th International Conference on Knowledge and Systems Engineering (KSE), Hanoi, Vietnam, 2023*, pp. 1-6.
22. Shamir A. Identity-Based Cryptosystems and Signature Schemes, *Advances in Cryptology*, 1985, Vol. 196, pp. 47-53.

23. Kulikov A.A. Primenenie biometricheskikh sistem v tekhnologiyakh identifikatsii lits [Application of biometric systems in face identification technologies], *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* [Russian Technological Journal], 2021, No. 9 (3), pp. 7-14.
24. Mizinov P.V., Konnova N.S., Basarab M.A., Pleshakova E.S. Parametric study of hand dorsal vein biometric recognition vulnerability to spoofing attacks, *Journal of Computer Virology and Hacking Techniques*, 2023, Vol. 20, pp. 383-396.
25. Bayanov B.I. Metod kvantovaniya s lineynym preobrazovaniem biometricheskikh dannykh dinamicheskogo rukopisnogo pocherka [Quantization method with linear transformation of biometric data of dynamic handwriting], *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Herald of Technological University], 2023, Vol. 26, No. 1, pp. 113-118.
26. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Ivanov A.P. Algoritm bystrogo vychisleniya entropii Shennona na malykh vyborkakh dlya dlinnykh kodov biometrii s sushchestvenno zavisimymi razryadami [Algorithm for fast computation of Shannon's entropy on small samples for long biometrics codes with essentially dependent digits], *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: Management, computer science and informatics], 2024, No. 4, pp. 27-34.
27. Sulavko A.E., Lozhnikov P.S., Samotuga A.E., Sulavko A.V., Stadnikov D.G., Choban A.G. Identifikatsionnyy potentsial elektroentsefalogramm v zadachakh informatsionnoy bezopasnosti: monografiya [The identification potential of electroencephalograms in information security tasks]. Omsk: Izd-vo OmGTU, 2025, 264 p.
28. Rybalov A.N. O genericheskoy slozhnosti problemy diskretnogo logarifma v posledovatel'nostyakh Lyuka [On the generic complexity of the discrete logarithm problem in Lucas sequences], *Prikladnaya diskretnaya matematika* [Applied discrete mathematics], 2024, No. 66, pp. 116-122.
29. Kurakin A.S. Model' razgranicheniya prav dostupa virtual'nogo otryada bespilotnykh letatel'nykh apparatov [A model of differentiation of access rights for a virtual squad of unmanned aerial vehicles], *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy* [Problems of information security. Computer systems], 2022, No. 3, pp. 121-129.
30. Cohen F. Computational aspects of computer viruses, *Computers & Security*, 1989, Vol. 8, No. 4, pp. 297-298.
31. Schlett T., Rathgeb C., Henniger O., Galbally J., Fierrez J., Busch C. Face Image Quality Assessment: A Literature Survey, *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2022, Vol. 54, Issue 10s, pp. 1-49.
32. Ivanov A.I. Neyrosetvoy mnogokriterial'nyy statisticheskiy analiz malykh vyborok. Proverka gipotezy nezavisimosti [Neural network multicriterial statistical analysis of small samples. Testing the hypothesis of independence]. Penza: Izd-vo PGU, 2023, 218 p.

Головской Василий Андреевич – Краснодарское высшее военное училище им. генерала армии С.М. Штеменко; e-mail: golovskoy_va@mail.ru; 350063, г. Краснодар, Россия; тел.: +79384762531; к.т.н.; доцент; начальник кафедры.

Винокуров Александр Владимирович – Краснодарское высшее военное училище им. генерала армии С.М. Штеменко; e-mail: vav73@rambler.ru; 350063, г. Краснодар, Россия; тел.: +79604913609; д.т.н.; доцент; профессор кафедры.

Golovskoy Vasily Andreevich – Krasnodar Higher Military School named after S.M. Shtemenko; e-mail: golovskoy_va@mail.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79384762531; cand. of eng. sc.; assistant of professor; head of the chair.

Vinokurov Alexander Vladimirovich – Krasnodar Higher Military School named after S.M. Shtemenko; e-mail: vav73@rambler.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79604913609; cand. of eng. sc.; associate professor; professor.

В.Д. Матвеев, А.Е. Архипов, И.С. Фомин**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СЕМАНТИЧЕСКОЙ СЕГМЕНТАЦИИ RTC-SAM
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ НА ПУТИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА**

Задача определения препятствий перед мобильным роботом успешно и давно решена с применением лазерных и ультразвуковых датчиков. Однако, препятствия, не обнаруживаемые такими видами датчиков, могут угрожать безопасности робота. Для их обнаружения в работе предлагается использовать систему технического зрения (СТЗ), информацию с которой обрабатывает нейронная сеть семантической сегментации, возвращающая маску препятствия на кадре и его класс. Основой для такой сети стала сеть универсальной сегментации SAM, требующая доработки для применения к задаче семантической сегментации. Особенность данной сети состоит в ее универсальной применимости, то есть возможности выделения любых объектов в произвольных условиях съемки. При этом SAM не предсказывает семантику объекта. В данной работе предложен дополнительный модуль, позволяющий реализовать семантическую сегментацию за счет классификации признаков выделяемых объектов. Обоснована возможность использования такого модуля для решения задачи дополнения выхода сети новой информацией. Результат классификации далее поступает в тот же алгоритм фильтрации, что и маски, чтобы гарантировать соответствие между полученным результатом универсальной сети и дополняющего модуля. После интеграции модуля с моделью получена новая модель семантической сегментации, названная в работе RTC-SAM. С ее помощью проведена семантическая сегментация общедоступного набора данных с изображениями открытой местности. Полученный результат в 45 % по метрике IoU превосходит результат существующих методов на 13 %. Показанные в работе изображения результатов применения новой сети позволяют убедиться в ее работоспособности. Также описано тестирование разработанного решения с проведением исследования быстродействия разработанной модели на ПК и мобильном вычислителе. Алгоритм на мобильном вычислителе показывает недостаточную скорость для выхода в режим реального времени – больше 3,5 секунд на обработку одного кадра. В связи с этим, одно из направлений дальнейших исследований в области повышения быстродействия системы.

Нейронная сеть; сегментация; классификация векторов; вектор представлений; система технического зрения; препятствия.

V.D. Matveev, A.E. Arkhipov, I.S. Fomin**COMBINING SEGMENTATION, TRACKING, AND CLASSIFICATION MODELS
TO SOLVE VIDEO ANALYTICS PROBLEMS**

The task of detecting obstacles in front of a mobile robot has been successfully solved long ago using laser and ultrasonic sensors. However, obstacles that are not detected by these types of sensors may endanger the safety of the robot. To detect them in the work, it is proposed to use a technical vision system (STZ), the information from which is processed by a semantic segmentation neural network, which returns the mask of the obstacle on the frame and its class. The basis for such a network was the SAM universal segmentation network, which requires further development to be applied to the semantic segmentation task. The peculiarity of this network is its universal applicability, that is, the ability to select any objects in any filming situation. At the same time, SAM does not predict the semantics of the object. In this paper, an additional module is proposed that makes it possible to implement semantic segmentation by classifying the features of the selected objects. The possibility of using such a module to solve the problem of supplementing the network output with new information is substantiated. The classification result is then fed into the same filtering algorithm as the masks to ensure consistency between the result of the universal network and the complementary module. After integrating the module with the model, a new semantic segmentation model was obtained, called RTC-SAM in the work. It was used to perform semantic segmentation of a publicly available dataset with images of an open area. The 45% result obtained by the IoU metric exceeds the result of existing methods by 13%. The images of the results of using the new network shown in the work make it possible to verify its performance. It also describes the testing of the developed solution with a study of the performance of the developed model on a PC and a mobile computer. The algorithm on the mobile computer shows insufficient speed to enter real-time mode – more than 3.5 seconds to process one frame. In this regard, one of the directions of further research in the field of improving system performance.

Neural network; segmentation, classification of vectors; representation vector; vision system; obstacles.

Введение. Использование мобильных роботов в открытой среде сопряжено с определенными рисками, которые могут оказать сильное влияние на выполнимость миссии робота. Одним из таких рисков является потеря устройства из-за попадания в неопределенное препятствие, которое не было распознано стандартными датчиками мобильных роботов – Lidar или ультразвуковыми датчиками [1, 2]. К такому виду опасных препятствий могут относиться, например, водные преграды – которые не обнаруживаются с помощью 2D-Lidar. Такого рода преграды могут быть обнаружены с помощью системы технического зрения (СТЗ), поскольку при телеуправлении оператор всегда обходит данные препятствия. Для управления роботом без оператора необходимо реализовать алгоритм обработки изображения на мобильном вычислителе с целью семантической сегментации объектов. Получаемые маски объектов можно использовать для построения пути мобильного робота.

Сегодня наилучшее качество работы для семантической обработки изображений демонстрируют нейронные сети. Существует множество моделей семантической сегментации, которые обучены выделять различные объекты на кадрах. Например, известная модель PSPNet [3] представила пирамидальную структуру обработки изображений, на основе которой работают многие последующие модели сегментации. Или одна из первых сегментационных моделей на основе трансформерных архитектур обработки изображений – SegFormer [4]. Однако, большинство моделей не обладают важным для мобильных систем свойством – универсальностью. Дело в том, что существующие на сегодняшний день наборы данных для сегментации изображений пересеченной местности (некоторые из них будут описаны далее в работе) имеют примерно в 2-3 раза меньше объем, чем наборы данных для обучения автовождению – в связи с чем качество обучения моделей на таких наборах сильно ниже того же обучения сегментации дороги. И поэтому, для задач с малым количеством обучающих данных стоит использовать более универсальные подходы. Довольно важным шагом в преодолении этой проблемы стало появление универсальной модели сегментации SAM (Segment Anything Model) [5], которая была обучена на огромном наборе данных и приблизилась к уровню фундаментальных моделей по возможностям сегментации. Единственный серьезный недостаток данной сети в том, что она возвращает маски объектов без классов – то есть не работает как семантический сегментатор.

В связи с этим, данная работа посвящена разработке новой модели сегментации на базе SAM модели, которая позволит применить качество формирования масок этой модели и ее универсальность к задачам семантической сегментации. В первую очередь, к задачам семантической сегментации препятствий перед мобильным роботом. Она является продолжением работы [6], которая посвящена комплексированию нескольких нейронных сетей для получения алгоритма семантической сегментации и сопровождения объектов.

Универсальная модель сегментации. Сегментация изображений способна формировать необходимые области, с которыми может взаимодействовать мобильный робот, для построения его дальнейшей системы управления. Наиболее качественно моделью на сегодняшний день является модель универсальной сегментации SAM (Segment Anything Model) [5]. Благодаря особому подходу к сегментации – сегментации по подсказкам, данная сеть не привязывается к определенным классам объектов и способна сегментировать любые объекты. Кроме того, данная модель была подготовлена на самом большом из существующих наборов данных, включающем в себя 11 миллионов изображений и более 1 миллиарда масок – что также способствует формированию общего представления объектов.

Модель формирует по несколько масок для каждой подсказки, для каждой точки из заранее заданной сетки, после чего в процессе работы алгоритма выбирает наиболее подходящую для отрисовки. Такой подход был продемонстрирован ранее в работе [7], показав, что задача семантической сегментации через попиксельную классификацию изображений не эффективна в плане обучения сети.

Однако, из-за такого принципа работы, сети универсальной сегментации SAM не обладает семантикой объектов, которые она выделяет. Для нее это просто объекты, и на соседних кадрах даже при совпадении масок они будут выделены по-разному. Что полностью не соответствует задаче выделения препятствий перед мобильным роботом. В связи с чем было принято решение доработать рассматриваемую модель дополнительно

ным модулем. Такой модуль должен работать без вмешательства в основную модель – чтобы не потерять накопленные полученные из самого крупного сегментационного дата-сета знания, и при этом реализовывать определение классов сегментированных объектов.

Классификация векторов представления сети. Вектор представления является частью скрытого состояния сети. Данные вектора формируются в ходе работы любых сетей и отражают входную и выходную информацию в виде некоторого массива чисел, понятного для конкретного шага сети. На работе с вектора представления сети, в частности – классификации, строится множество нейронных сетей. Так, многие языковые трансформеры, вроде GPT-3/4 или Claude [8, 9] переводят информацию в векторное представление для ее дальнейшего распознавания и присвоения текстам различных классов.

Кроме того, специальный тип обучения – контрастное обучение [10], полностью строится на работе с векторами представления. Суть этого типа обучения заключается в том, что векторы представления похожих объектов сближаются, а отличных друг от друга – намерено удаляются. Таким образом удастся сформировать некоторое пространство, попадая в которое новые вектора признаков сразу же оказываются возле нужного класса. Как, например, это сделано в универсальной модели классификации CLIP [11] – модель обучалась сближать векторные представления изображений и векторные представления их текстовых описаний. И на этапе тестирования, на вход подается изображение – а на выходе его наиболее близкое текстовое описание.

Из приведенных выше примеров можно сделать вывод, что классификация сегментированных областей по векторам представлений может быть работоспособна. В качестве классификатора векторов представлений в данной работе будет использован многослойный перцептрон, обученный на собранных векторах признаков и затем добавленный к оригинальной модели. Данный вид сети выбран потому, что небольшим размером (возможно уложиться в 100 тысяч параметров), в отличие от довольно известных сетей классификации, вроде VGG16 [12] – что напрямую сказывается на скорости обучения и нагрузке вычислителя, на котором работает алгоритм.

Классификация векторов представления. Следующим этапом необходимо выяснить, где в модели формируются наиболее подходящие для классификации вектора представлений. Архитектура SAM состоит из двух энкодеров (для изображений и подсказок) и одного декодера (для формирования маски). Энкодер изображений позволяет извлекать семантическое представление всего изображения, без привязки к какому-либо объекту, в то время как энкодер подсказок наоборот – выделяет пространственное представление без привязки к конкретному изображению. Объединение признаков из этих двух источников информации происходит в декодере, позволяя выделить в общем семантическом представлении нужный объект. На рис. 1 представлена архитектура декодера с нанесенными на нее точками, в которых проводятся первые тесты возможности классификации.

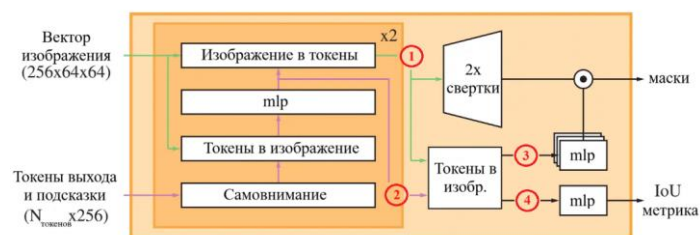


Рис. 1. Архитектура декодера и точки сбора векторов представления

Представленные точки представляют наибольший интерес, поскольку в каждой из них гарантировано произошло объединение признаков от изображений и подсказок, с дальнейшим проведением различных операций. Полученные результаты сравниваются по доле верно распознанных изображений, а также по размеру вектора признаков, который напрямую влияет на размер обучаемого многослойного перцептрона.

Набор данных. Для тестирования алгоритма определения препятствий перед мобильным роботом был проведен поиск подходящих наборов данных. Существует множество открытых наборов данных, снятых с камер мобильных роботов или в сходной с ними перспективе [13–15]. Однако, в этих датасетах отсутствует разметка семантической сегментации, с которой можно было бы затем сравнить свое разработанное решение. Для тестирования рассматриваемой задачи разработки семантического сегментатора определения препятствий мобильным роботом было найдено всего два подходящих набора данных – RUGD [16] и Rellis-3d [17]. Оба этих датасета содержат примеры проездов мобильных роботов в открытой среде, а также разметку окружающих его объектов. На рис. 2 представлены примеры из этих наборов данных – в левой части из RUGD, в правой из Rellis-3d.



Рис. 2. Пример изображений из используемых наборов данных

В дальнейшей работе набор данных RUGD был использован для обучения и тестирования многослойного персептрона, в то время как на Rellis-3d проводилось только тестирование. Это связано с тем, что в оригинальной работе RUGD есть расчет метрик сегментации Intersection over Union (IoU), о которой будет сказано ниже, и таким образом обучившись на том же, на чем обучаются авторы работы и протестировав на том же возможно проведение сравнения качества семантической сегментации объектов с помощью новой модели нейронной сети.

Классы для многослойного персептрона и последующей семантической сегментации были выбраны следующие: «опорная поверхность» – часть пространства, по которому робот может проехать без каких-либо затруднений, «препятствие» – небольшие препятствия на пути робота, требующие внимания, однако возможно преодолимые, как например камни или невысокий кустарник, «деревья» – высокие препятствия, непреодолимые для робота, собственно деревья, фонарные столбы, «вода» – водные преграды, которые встречаются на некоторых проездах, хотя и редко; «небо» – класс, не имеющий отношения к обходу препятствий, однако присутствующий на любых кадрах вне зданий – и введенный для избежания ошибок классификации.

Разработка классификатора векторов. Обучение многослойного персептрона проходило на изображениях из обучающей выборки RUGD набора данных. Изображения подавались в сеть вместе с равномерной сеткой подсказок. Для каждой пары изображение – точка формировалось по три вектора представления внутри сети SAM (согласно алгоритму работы самой SAM). Затем полученные представления и соответствующие им маски сохранялись под классом, который формировался следующим образом. Каждая маска сравнивалась с областями, размеченными людьми в RUGD. Класс той области, с которой была наибольшая метрика IoU у полученной маски, и присваивался вектору представлений для дальнейшего обучения. Тестирование возможности использования классификатора векторов представления было проведено на одном небольшом проезде из RUGD с около 7500 сформированными векторами для обучения. В наилучшей точке приложения классификатора были обработаны все обучающий проезды изначального набора и получено более 130 тысяч векторов.

Затем проходило обучение самого многослойного персептрона с использованием хорошо изученного стохастического градиентного спуска (Stochastic Gradient Descent, SGD) [18] в течение 30 эпох. Далее этот классификатор тестировался на векторных представлениях тестовых проездов, сформированных SAM моделью.

Семантическая сегментация. После выбора точки классификации и подготовки многослойного персептрона он встраивается в изначальный алгоритм сети SAM, дополняя и не изменяя его. Таким образом получается новая модель сети семантической сегментации, RTC-SAM, чья обобщенная архитектура представлена на рис. 3. На ней желтым выделено то, что было в оригинальном SAM, а зеленым показаны доработанные части.

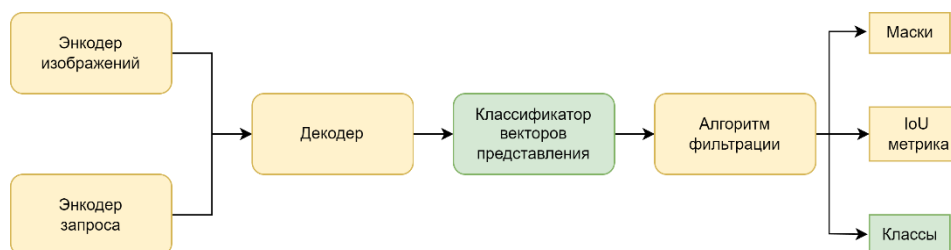


Рис. 3. Обобщенная архитектура разработанной сети

Затем, с помощью указанной модели была проведена семантическая сегментация тестовых проездов RUGD для возможности сравнения полученных результатов с разработанными ранее методами. Сравнение проводилось по метрике Intersection Over Union, которая представлена в формуле 1.

$$IoU = \frac{Overlap}{Union}, \quad (1)$$

где *Overlap* – площадь пересечения разметки объекта и созданной алгоритмом маски,

Union – объединенная площадь разметки объекта и созданной алгоритмом маски.

Далее проходило усреднение результатов по классам, поскольку в оригинальной работе RUGD уже дано mean IoU – т.е. среднее значение метрики; а также потому, что количество классов в настоящей работе меньше, чем в рассматриваемом наборе данных.

Выбор точки установки классификатора. После обучения классификатора в четырех точках, показанных выше на рис. 1, и проведения тестирования были получены результаты, сформировавшие таблицу табл. 1.

Таблица 1

Результат обучения классификатора в различных частях декодера

№ точки	Количество элементов вектора признаков	Верно распознанные изображения из теста, %
1	1 048 576	95
2	1 792	87,5
3	1 024	92,5
4	256	82,5

Из таблицы видно, что наибольшую точность показывает первая точка. Однако, она также имеет и наибольший размер вектора признаков. Персептрон, являясь полносвязной моделью машинного обучения, с таким размером вектора признаков будет иметь больше 200 млн параметров – слишком большое значение, не подходящее для применения на мобильном вычислителе (упомянутая VGG16, принятая не удовлетворительной, имеет 138 млн). С другой стороны, третья точка, обладая близкой точностью, имеет в разы меньше параметров – около 200 тысяч. Данная точка больше подходит для создания классификатора векторов признаков, поскольку гораздо меньше увеличивает нагрузку на вычислитель потенциального робота. Она и выбрана для дальнейшей разработки алгоритма.

Результат семантической сегментации. После выбора точки применения классификатора он был обучен на проездах из обучающего набора RUGD, добавлен к изначальной модели сегментации по подсказкам, в соответствии с рис. 3, и затем общий полученный алгоритм испытан на тестовых проездах RUGD. В табл. 2 представлены результаты

сравнения полученной модели семантической сегментации с моделями, использованными при разработке самого датасета. В работе авторы использовали ResNet50 [19] в качестве энкодера для перевода изображений в пространство представлений, а в качестве декодера: простые последовательности блоков, упомянутую PSPNet или UperNet [20].

Таблица 2

Результат сравнения работы семантической сегментации разработанной моделью

Модель семантической сегментации	Среднее IoU, %
ResNet50 + восстанавливающая свертка, апсемплинг и проверка	32,24
ResNet50 + PSPNet	32,07
ResNet50 + PSPNet с проверкой	31,71
ResNet50 + Upernet	31,95
RTC-SAM (разработанная модель)	45,03

Из таблицы видно, что разработанная модель превосходит базовые методы, с которыми проходило сравнение, на довольно значительное количество процентов. Отсюда можно сделать вывод, что точность и аккуратность масок, формируемых SAM моделью – действительно довольно высока. А доработка основной модели небольшим (при размере SAM модели в 90 млн параметров) классификатором позволила применить этот высококачественный результат сегментации к новой задаче. На рис. показаны достигнутые результаты семантической сегментации на наборах RUGD и Rellis-3d. Зеленым цветом выделены опорные поверхности для робота; красным – препятствия; фиолетовым – деревья; голубым – небо.

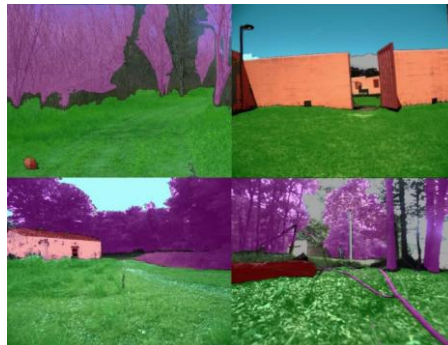


Рис. 4. Результат семантической сегментации с помощью разработанной модели

Исследование быстродействия модели на мобильном вычислителе. После подтверждения работоспособности разработанного алгоритма семантической сегментации на основе универсальной модели и обученного классификатора, было проведено тестирование быстродействия метода. Проведены замеры времени работы алгоритма как на мобильном вычислителе для предполагаемого робота – Nvidia Jetson AGX Xavier, так и на лабораторном ПК, чья работоспособность оценивается примерно в 3 раза выше по количеству операций с плавающей точкой (Flops), чем работоспособность самого современного встраиваемого Jetson AGX Orin. В табл. 3 представлены характеристики обоих устройств, на которых проходили замеры.

Быстродействие измерялось при разном количестве точек, которые выступают в качестве подсказок в алгоритме. Плотность этих точек напрямую влияет на количество выделяемых объектов и необходимых к обработке областей. В табл. 4 представлены результаты замеров времени, затрачиваемого на обработку одного изображения с различным количеством точек.

Таблица 3

Характеристики используемых устройств

Характеристика	Лабораторный ПК	Nvidia Jetson Xavier
Процессор	Intel Core i7-6700 @3.4ГГц x 8	Tegra Xavier 8xNvidia Carmel @2.26ГГц
Видеоускоритель	Nvidia GeForce RTX 2080 Ti 12 Гб	Nvidia Volta GV10B 32 Гб
Объем оперативной памяти	16 Гб	32 Гб, используется вместе с GPU

Таблица 4

Измерение быстродействия алгоритма, сек

Количество точек (подсказок) на 1 изображение	5x5	10x10	20x20
Лабораторный ПК	0,379	0,539	1,089
Nvidia Jetson Xavier	3,82	4,61	7,83

Из данной таблицы можно сделать несколько выводов. Во-первых, с ростом количества точек компьютер затрачивает больше времени на их обработку – двухкратный рост времени при переходе с 10x10 к 20x20 точек – в то время как у Jetson рост времени составляет 1,7 раз. Это показывает, что используемое на мобильном вычислителе программное обеспечение более оптимизировано и легче справляется со своей задачей – обработки вычислений с нейронными сетями, чем ПО на компьютере, где оно кроме таких вычислений предполагается для отрисовки графики и 3D моделей.

Второй важный вывод состоит в том, что мобильный вычислитель в целом работает в 10 раз медленнее лабораторного ПК и не выдает даже 1 кадра в секунду производительности. Такой результат не позволяет говорить о режиме реального времени для алгоритма на мобильном роботе и ставит задачу дальнейшего исследования в сторону увеличения производительности. Однако, доказательство возможности использования последних алгоритмов в области обработки изображений нейронными сетями на предыдущих поколениях вычислителей позволяет использовать эти вычислители в различных прикладных задачах – вместе с разрабатываемыми алгоритмами.

Заключение. В настоящей работе рассмотрена разработка сети семантической сегментации RTC-SAM для сегментации препятствий на пути мобильного робота. Сеть строится на основе сети универсальной сегментации SAM, которая формирует маски объектов по подсказкам – но без понимания классов. Для классификации сформированных масок предложено использование классификатора векторов представления признаков и обоснована возможность такого подхода. Далее выбраны точки, в которых проведение классификации признаков кажется наиболее возможным, а также обучены классификаторы на небольшом поднаборе для каждой из этих точек. Сделан вывод о том, что классификация векторов представления в рассматриваемой задаче возможна с достаточно высокими точностями до 95 % по долям верного распознавания, и выбрана наиболее подходящая для работы на мобильном устройстве точка.

Затем классификатор в этой точке переобучен на большем количестве обучающих данных выбранного датасета – и интегрирован в универсальную сеть сегментации SAM. Полученная таким образом сеть семантической сегментации RTC-SAM применена к тестовым данным выбранного датасета для получения метрики семантической сегментации. Данная метрика позволила сравнить имеющиеся подходы с разработанным, который показал свое превосходство на 13 % по метрике усредненного IoU.

Портирование разработанной сети на мобильный вычислитель Nvidia Jetson Xavier оказалось возможным, однако проведение замеров быстродействия на данном оборудовании показало, что на данном этапе достичь режима реального времени на мобильном роботе не получится – алгоритм показал скорость работы меньше 1 кадра в секунду, в то время как лабораторный ПК показывает 2,64 кадра/сек.

В связи с этим, определены следующие направления дальнейших исследований. Во-первых, необходимо повысить скорость работы алгоритма. Для этого стоит проверить возможность оптимизации универсальной сети сегментации, так как именно она тратит наибольшее время в рассматриваемом методе. Во-вторых, провести применения разработанного подхода – семантической сегментации за счет классификации векторов представления – на новой версии универсальной сети SAM2.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России «Исследование методов анализа слабоструктурированных данных, обработки знаний и создания когнитивных агентов на базе комбинированных глубоких нейронных сетей» (FNRG-2025-0008 1024050200009-5-1.2.1;2.2.2)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Peng Y. et al. The obstacle detection and obstacle avoidance algorithm based on 2-d lidar // 2015 IEEE international conference on information and automation. – IEEE, 2015. – P. 1648-1653.
2. Gibbs G., Jia H., Madani I. Obstacle detection with ultrasonic sensors and signal analysis metrics // Transportation Research Procedia. – 2017. – Vol. 28. – P. 173-182.
3. Zhao H. et al. Pyramid scene parsing network // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2017. – P. 2881-2890.
4. Xie E. et al. SegFormer: Simple and efficient design for semantic segmentation with transformers // Advances in neural information processing systems. – 2021. – Vol. 34. – P. 12077-12090.
5. Kirillov A. et al. Segment anything // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. – 2023. – P. 4015-4026.
6. Архипов А.Е., Фомин И.С., Матвеев В.Д. Комплексирование моделей сегментации, сопровождения и классификации для решения задач видеоаналитики // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 1.
7. Cheng B., Schwing A., Kirillov A. Per-pixel classification is not all you need for semantic segmentation // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2021. – Vol. 34. – P. 17864-17875.
8. Anthropic A.I. Claude 3.5 sonnet model card addendum // Claude-3.5 Model Card. – 2024. – Vol. 3.
9. Kalyan K.S. A survey of GPT-3 family large language models including ChatGPT and GPT-4 // Natural Language Processing Journal. – 2024. – Vol. 6. – P. 100048.
10. Chen T. et al. A simple framework for contrastive learning of visual representations // International conference on machine learning. – PMLR, 2020. – P. 1597-1607.
11. Radford A. et al. Learning transferable visual models from natural language supervision // International conference on machine learning. – PMLR, 2021. – P. 8748-8763.
12. Simonyan K. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // arXiv preprint arXiv:1409.1556. – 2014.
13. Jeong S., Kim H., Cho Y. Diter: Diverse terrain and multi-modal dataset for field robot navigation in outdoor environments // IEEE Sensors Letters. – 2024.
14. Shah D. et al. Rapid exploration for open-world navigation with latent goal models // arXiv preprint arXiv:2104.05859. – 2021.
15. Shah D. et al. Ving: Learning open-world navigation with visual goals // 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2021. – P. 13215-13222.
16. Wigness M. et al. A rugd dataset for autonomous navigation and visual perception in unstructured outdoor environments // 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2019. – P. 5000-5007.
17. Jiang P. et al. Rellis-3d dataset: Data, benchmarks and analysis // 2021 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). – IEEE, 2021. – P. 1110-1116.
18. Amari S. Backpropagation and stochastic gradient descent method // Neurocomputing. – 1993. – Vol. 5, No. 4-5. – P. 185-196.
19. He K. et al. Deep residual learning for image recognition // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2016. – P. 770-778.
20. Xiao T. et al. Unified perceptual parsing for scene understanding // Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV). – 2018. – P. 418-434.

REFERENCES

1. Peng Y. et al. The obstacle detection and obstacle avoidance algorithm based on 2-d lidar, 2015 IEEE international conference on information and automation. IEEE, 2015, pp. 1648-1653.
2. Gibbs G., Jia H., Madani I. Obstacle detection with ultrasonic sensors and signal analysis metrics, Transportation Research Procedia, 2017, Vol. 28, pp. 173-182.

3. Zhao H. et al. Pyramid scene parsing network, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2017, pp. 2881-2890.
4. Xie E. et al. SegFormer: Simple and efficient design for semantic segmentation with transformers, *Advances in neural information processing systems*, 2021, Vol. 34, pp. 12077-12090.
5. Kirillov A. et al. Segment anything, *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, 2023, pp. 4015-4026.
6. Arkhipov A.E., Fomin I.S., Matveev V.D. Kompleksirovanie modeley segmentatsii, soprovozhdeniya i klassifikatsii dlya resheniya zadach videoanalitiki [Integration of segmentation, tracking and classification models for solving video analytics problems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 1.
7. Cheng B., Schwing A., Kirillov A. Per-pixel classification is not all you need for semantic segmentation, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2021, Vol. 34, pp. 17864-17875.
8. Anthropic A.I. Claude 3.5 sonnet model card addendum, *Claude-3.5 Model Card*, 2024, Vol. 3.
9. Kalyan K.S. A survey of GPT-3 family large language models including ChatGPT and GPT-4, *Natural Language Processing Journal*, 2024, Vol. 6, pp. 100048.
10. Chen T. et al. A simple framework for contrastive learning of visual representations, *International conference on machine learning*. PMLR, 2020, pp. 1597-1607.
11. Radford A. et al. Learning transferable visual models from natural language super-vision, *International conference on machine learning*. PMLR, 2021, pp. 8748-8763.
12. Simonyan K. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // arXiv preprint arXiv:1409.1556, 2014.
13. Jeong S., Kim H., Cho Y. Diter: Diverse terrain and multi-modal dataset for field robot navigation in outdoor environments, *IEEE Sensors Letters*, 2024.
14. Shah D. et al. Rapid exploration for open-world navigation with latent goal models, *arXiv preprint arXiv:2104.05859*, 2021.
15. Shah D. et al. Ving: Learning open-world navigation with visual goals, *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2021, pp. 13215-13222.
16. Wigness M. et al. A rugd dataset for autonomous navigation and visual perception in unstructured outdoor environments, *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2019, pp. 5000-5007.
17. Jiang P. et al. Rellis-3d dataset: Data, benchmarks and analysis, *2021 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*. IEEE, 2021, pp. 1110-1116.
18. Amari S. Backpropagation and stochastic gradient descent method, *Neurocomputing*, 1993, Vol. 5, No. 4-5, pp. 185-196.
19. He K. et al. Deep residual learning for image recognition, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, pp. 770-778.
20. Xiao T. et al. Unified perceptual parsing for scene understanding, *Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV)*, 2018, pp. 418-434.

Матвеев Виктор Дмитриевич – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: v.matveev@rtc.ru; Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125523351; инженер.

Архипов Андрей Евгеньевич – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: a.arkhipov@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125523351; младший научный сотрудник.

Фомин Иван Сергеевич – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: i.fomin@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125523351; научный сотрудник.

Matveev Victor Dmitrievich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: v.matveev@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125523351; engineer.

Arkhipov Andrey Evgenievich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: a.arkhipov@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125523351; junior researcher.

Fomin Ivan Sergeevich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: i.fomin@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125523351; researcher.

Б.В. Павлов, Д.А. Гольдин, Е.А. Третьякова**МОДЕЛИ ИЗМЕРЕНИЙ БОРТОВЫХ МАГНИТОГРАДИЕНТНЫХ СИСТЕМ**

Целью данного исследования является разработка усовершенствованной модели магнитно-градиентной измерительной системы, которая играет ключевую роль при решении задачи одновременного оценивания параметров магнитного поля Земли (носителя) и параметров аномального магнитного поля. Актуальность исследования обусловлена необходимостью оптимизации процесса дифференциальной магнитометрии. Дифференциальная магнитометрия позволяет выделять полезную информацию из магнитного поля без необходимости проведения трудоемкого и длительного детального картирования местности. Это достигается за счет оценки параметров градиента магнитного поля, что значительно повышает информативность и оперативность определения местоположения источников магнитных аномалий. Однако на измерения физических полей существенно влияют различные помехи, которые могут возникать из-за погрешностей оборудования и конструкции, а также из-за проявления их магнитных свойств. Эти помехи искажают результаты измерений и снижают точность определения параметров магнитного поля. В связи с этим, разработка модели, учитывающей влияние помех и компенсирующей их воздействие, является крайне важной задачей. Предлагаемая модель магнитноградиентной измерительной системы будет учитывать влияние помех и компенсировать их воздействие, что позволит значительно повысить точность оценки параметров магнитного поля. Кроме того, модель поможет решать задачу совместного оценивания параметров поля носителя и констант, входящих в модель измерений. Это повысит эффективность дифференциальной магнитометрии и сделает ее более применимой в различных сферах. В частности, усовершенствованная магнитноградиентная измерительная система будет полезна в геофизическом картировании, поиске полезных ископаемых, мониторинге окружающей среды, а также в специфических условиях боевой обстановки. Например, в геофизическом картировании она позволит более точно определять границы различных геологических структур, что важно для поиска полезных ископаемых. В условиях очистки освобожденных территорий от оставленных противником скрытых объектов, таких как мины или подземные сооружения, система поможет быстро и точно их выявлять, что значительно повысит безопасность военнослужащих и мирного населения. Таким образом, разработка усовершенствованной модели магнитноградиентной измерительной системы имеет широкий спектр потенциальных применений и является важным шагом в развитии технологий дифференциальной магнитометрии.

Магнитное поле; магнитоградиентные измерительные системы; тензорные градиентометры; векторные градиентометры.

B.V. Pavlov, D.A. Goldin, E.A. Tretyakova**MEASUREMENT MODELS OF ON-BOARD MAGNETOGRADIENT SYSTEMS**

The purpose of this study is to develop an improved model of a magnetically gradient measuring system, which plays a key role in solving the problem of simultaneous estimation of the parameters of the Earth's magnetic field (carrier) and the parameters of the anomalous magnetic field. The relevance of the study is due to the need to optimize the process of differential magnetometry. Differential magnetometry allows you to extract useful information from a magnetic field without the need for time-consuming and lengthy detailed mapping of the area. This is achieved by estimating the parameters of the magnetic field gradient, which significantly increases the information content and efficiency of determining the location of sources of magnetic anomalies. However, measurements of physical fields are significantly affected by various disturbances that may occur due to equipment and design errors, as well as due to their magnetic properties. These interferences distort the measurement results and reduce the accuracy of determining the magnetic field parameters. In this regard, the development of a model that takes into account the effects of interference and compensates for their effects is an extremely important task. The proposed model of a magnetically gradient measuring system will take into account the effects of interference and compensate for their effects, which will significantly improve the accuracy of estimating magnetic field parameters. In addition, the model will help solve the problem of jointly estimating the parameters of the carrier field and the constants included in the measurement model. This will increase the efficiency of differential magnetometry and make it more applicable in various fields. In particular, the improved magnetically gradient measuring system will be useful in geophysical mapping, mineral prospecting, environmental

monitoring, as well as in specific combat conditions. For example, in geophysical mapping, it will allow you to more accurately determine the boundaries of various geological structures, which is important for the search for minerals. In the conditions of clearing the liberated territories of hidden objects left by the enemy, such as mines or underground structures, the system will help to identify them quickly and accurately, which will significantly increase the safety of military personnel and civilians. Thus, the development of an improved model of a magnetically gradient measuring system has a wide range of potential applications and is an important step in the development of differential magnetometry technologies.

Magnetic field; magnetogradient measuring systems; tensor gradiometers; vector gradiometers.

Введение. Поиск различных магнитных объектов, находящихся в приповерхностных слоях Земли, является важной военно-инженерной задачей [1–3]. Признаками для их поиска могут являться вызываемые ими магнитные нарушения естественной картины распределения параметров магнитного поля на исследуемой территории.

Обусловленное влиянием магнитного возмущающего объекта изменение магнитного поля, как правило, весьма невелико, а самое главное, быстро убывает по мере удаления точки наблюдения от объекта поиска. Величина магнитной аномалии даже вблизи объекта сопоставима с амплитудой вариаций магнитного поля.

Использование дифференциальной магнитометрии [4, 5] для поисков локальных неподвижных магнитных объектов осложняется тем, что естественное магнитное поле на обследуемой территории существенно неоднородно по площади. Для использования дифференциальной магнитометрии в этом случае требуется высокдетальное магнитное картирование местности, что не только технически сложно и трудоемко, но и небезопасно в условиях минирования. Однако современные исследования показывают, что для этих целей может быть использована информация, содержащаяся в измерении параметров градиента магнитного поля [6]. Обладая значительно большей информативностью по сравнению с результатами классических магнитных измерений, данные градиента могут служить основой пассивной магнитной пеленгации и локации магнитовозмущающих объектов.

Какова бы ни была магнитоградиентная измерительная система, ее работа связана с погрешностями и помехами, которые неизбежно возникают в процессе измерений. Во-первых, существуют погрешности конструкции, которые необходимо учитывать при обработке данных, а также погрешности отдельных датчиков, входящих в магнитоградиентную систему. Их влияние может быть критическим для результатов поиска магнитных объектов, поэтому соответствующие параметры необходимо оценивать в процессе калибровки и учитывать в дальнейшем при обработке измерений [7]. Во-вторых, может проявляться влияние магнитных свойств конструкции носителя, на котором устанавливается магнитоградиентная измерительная система. Параметры такого влияния проявляются в движении и также могут быть откалиброваны. Для решения задачи совместного оценивания параметров поля носителя и параметров аномального магнитного поля надо знать модель магнитоградиентной измерительной системы. Построению математических моделей в развитие [8] посвящена данная статья.

Модель носителя. Рассмотрим сначала задачу выбора моделей статического поля носителя, т.е. магнитного поля, создаваемого жестко намагниченными частями корпуса, а также перемангничиванием конструкционных материалов во внешнем магнитном поле Земли. Обзор одного из современных подходов к решению подобных задач дан в работе [9], согласно которому собственное магнитное поле некоторого объекта, помещенного в известное внешнее магнитное поле, может быть представлено как сумма полей точечных магнитных диполей:

$$B_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{R_i^3} (3e_i e_i^T - I), \quad (1)$$

где $R_i = |r_i - r|$, $e_i = (r_i - r)/R_i$, I – единичная матрица 3×3 , μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 \approx 1.256610^{-6}$ Гн/м, m_i – дипольный магнитный момент точечного диполя, r_i – радиус-вектор точки расположения диполя, r – радиус-вектор точки наблюдения. При этом дипольные магнитные моменты m_i даются формулой:

$$m_i = m_i^{perm} + m_i^{ind}(B_1 + B_e), \quad (2)$$

где m_i^{perm} – составляющая, связанная с жестким намагничиванием, m_i^{ind} – коэффициент, определяющий мягкую составляющую намагничивания, B_0 – внешнее магнитное поле.

Динамическая составляющая магнитного поля носителя вызывается действием вихревых токов из-за наводящихся в корпусе носителя различных электрических машин и механизмов. В настоящее время в научной литературе накопился большой объем работ, описывающих построение динамических моделей поля носителя, основы которого были заложены Н. DeVoe еще в 1964 г. в работе [10]. В дальнейшем данная модель была использована в работах [11, 12]. В [13] показано, что решение задачи о динамическом поле носителя может быть представлено как сумма полей точечных диполей. Разумеется, в динамическом случае, формула для поля диполя уже не имеет такого простого вида, как (1) (см., например, [14, 15]), кроме того, присутствует вклад диполей электрического типа. Вместе с тем, учитывая, что углы колебаний носителя малы, постоянная времени этих колебаний велика, а поля работающих машин и механизмов в значительной степени экранированы корпусом и убывают, будем для приближенной оценки поля носителя пользоваться формулой (1) без каких-либо модификаций и при этом учитывать динамическую компоненту поля.

Итак, поле носителя вычисляется как поле системы точечных магнитных диполей в соответствии с формулой (1); при этом дипольные магнитные моменты данных диполей m_i определяются как:

$$m_i = \hat{m}_i^{perm} + m_i^{ind} B_e + m_i^{dyn}(\Omega) B_e, \quad (3)$$

где $m_i^{dyn}(\Omega)$ – коэффициент, описывающий динамическую составляющую поля и зависящий от угловой скорости носителя Ω .

Модель измерений наведенного поля. Наведенное поле B_c описывается суммой постоянного вектора B_{perm} , произведения постоянной матрицы на вектор внешнего поля $A^{ind} B_0$ и произведением другой постоянной матрицы на производную вектора внешнего поля $A^{eddy} \partial B_0 / \partial t$.

$$B_{изм} = B_0 + B_c, B_c = B_{perm} + B_{ind} + B_{eddy} = B_{perm} + A^{ind} B_0 + A^{eddy} \frac{\partial B_0}{\partial t}. \quad (4)$$

Это уравнение описывает влияние трех диполей: постоянный магнитный диполь, диполь, появляющийся благодаря магнитной восприимчивости некоего элементарного объема, и диполь, связанный с вихревыми токами в том же объеме. Все три диполя можно задать расположенными в одной точке с фиксированными координатами.

Модель (4) известна в литературе как модель Лелиака [16]. Ограничения в такой модели наложены на неизменность магнитных и проводящих свойств носителя и геометрических параметров установки, включая жесткость корпуса системы и крепления датчика. Важно отметить, что все постоянные в данном выражении – постоянные вне зависимости от направления движения.

Поскольку при измерениях вектор B_0 известен не полностью, доступна только его нормальная составляющая, то при оценивании параметров наведенного поля одновременно нужно оценивать аномальную составляющую. В этом случае совместная система уравнений становится нелинейной – в правой части содержатся квадратичные члены.

Если полагать, что для модулей векторов $|B_c| \ll |B_0|$, можно поставить линейную задачу с моделью наведенного поля в виде

$$B_c = B_{perm} + A^{ind} B_{изм} + A^{eddy} \frac{\partial B_{изм}}{\partial t} + \frac{Q}{|B_0|} \left(\frac{|B_c|}{|B_0|} \right)^2. \quad (5)$$

Верно следующее равенство

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_{u3M}}{\partial t} &= B_{u3M} \frac{\partial e_{u3M}}{\partial t} + e_{u3M} \frac{d|B_{u3M}|}{dt} \Rightarrow \\ A^{eddy} \frac{\partial B_{u3M}}{\partial t} &= |B_{u3M}| A^{eddy} \frac{\partial e_{u3M}}{\partial t} + \frac{d|B_{u3M}|}{dt} A^{eddy} e_{u3M}, \end{aligned} \quad (6)$$

С учетом этого с точностью до малых второго порядка

$$\frac{B_c}{|B_{u3M}|} = b_{perm} + A^{ind} e_{u3M} + A^{eddy} \frac{\partial e_{u3M}}{\partial t} + \frac{1}{|B_{u3M}|} \frac{d|B_{u3M}|}{dt} A^{eddy} e_{u3M}. \quad (7)$$

В том случае, когда матрица вихревой составляющей наведенного поля хорошо обусловлена, величина градиента внешнего поля не должна значительно превосходить скорость изменения поля, связанную с угловыми скоростями. Однако при угловых скоростях порядка 0,1 рад/с изменение проекций поля от углового движения объекта составят величину порядка 1000 нТл/с. Исходя из этого, последнее слагаемое в уравнении (7) можно исключить.

Таким образом, наведенное поле для каждой измеряемой компоненты может быть описано 7-ю параметрами. Для трехкомпонентного датчика – 21 коэффициент.

Модель измерений поля тензорным градиентометром. Измерения тензорного градиентометра строятся на вычислении разностей компонент вектора магнитного поля на фиксированном плече. Исходя из сделанных при описании модели Лелиака предположений, согласно которым в модели наведенного поля не учитывается его изменчивость вдоль корпуса, модель наведенного поля при измерении градиента также определяется внешним полем в одной точке, например, в точке установки датчика с индексом 1. Для каждого из датчиков можно записать в тензорном виде следующее соотношение, опуская индекс *изм*, 1

$$\frac{B_{cj}}{|B|} = b_{permj} + A_{jk}^{ind} e_k + A_{jk}^{eddy} e'_k + \frac{1}{|B|} \frac{d|B|}{dt} A_{jk}^{eddy} e_j, j = 2, 3, 4, \quad (8)$$

где в каждом слагаемом с повторяющимися индексами *k* выполняется суммирование по *k* от 1 до 3, e'_k – обозначение для *k*-й компоненты вектора производной $\partial e / \partial t$. Тогда модель для наведенной составляющей градиента можно получить, взяв разности для моделей в соответствующих точках:

$$\begin{aligned} \frac{\nabla_{ij}^2 U_c^B}{|B|} &= \nabla_{ij}^2 \frac{U_{perm}^B}{|B|} + A_{ijk}^{ind} e_k + A_{ijk}^{eddy} e'_k + \frac{1}{|B|} \frac{d|B|}{dt} A_{ijk}^{eddy} e_k, \\ \nabla_{ij}^2 \frac{U_{perm}^B}{|B|} &= b_{permj(i)} - b_{permj(1)}, A_{ijk}^{ind} = A_{jk(i)}^{ind} - A_{jk(1)}^{ind}, A_{ijk}^{eddy} = A_{jk(i)}^{eddy} - A_{jk(1)}^{eddy}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для описания модели наведенного градиента требуется задать при фиксированных *i, j* восемь коэффициентов, а всего пар *i, j*, для которых необходимо вычислить наведенное поле, – пять, если рассматриваются измерения тензора в линейной постановке, и девять для нелинейно постановки.

Модель измерения поля векторным градиентометром. В случае со скалярным датчиком измеряется не вектор поля, а его модуль. Если переписать соотношение модели Лелиака (4) для квадратов модуля, вектор наведенного поля войдет два раза – как линейный и как квадратичный член:

$$\begin{aligned} \frac{\nabla_{ij}^2 U_c^B}{|B|} &= \nabla_{ij}^2 \frac{U_{perm}^B}{|B|} + A_{ijk}^{ind} e_k + A_{ijk}^{eddy} e'_k + \frac{1}{|B|} \frac{d|B|}{dt} A_{ijk}^{eddy} e_k, \\ \nabla_{ij}^2 \frac{U_{perm}^B}{|B|} &= b_{permj(i)} - b_{permj(1)}, A_{ijk}^{ind} = A_{jk(i)}^{ind} - A_{jk(1)}^{ind}, A_{ijk}^{eddy} = A_{jk(i)}^{eddy} - A_{jk(1)}^{eddy}. \end{aligned} \quad (10)$$

Если предположить, что модуль вектора девиации, отнесенный к модулю измеренного вектора поля, – малая величина ε :

$$\frac{|B_c|}{|B_{изм}|} = \varepsilon \ll 1, \quad (11)$$

можно выписать выражение для модуля поля как степенной ряд по ε .

$$\begin{aligned} |B_0| &= \sqrt{B_{изм}^2 - 2B_c^T B_{изм} + B_c^2}, \\ \left(\frac{|B_{изм}|}{|B_{изм}|}\right)^2 &\equiv 1, \left(\frac{B_c^T}{|B_{изм}|} \frac{B_{изм}}{|B_{изм}|}\right) \sim \varepsilon, \left(\frac{|B_c|}{|B_{изм}|}\right)^2 \sim \varepsilon^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Нулевая степень отвечает измеренному полю, первая степень – это составляющая, которая называется моделью Лелиака применительно к измерениям модуля [17–19], а вторая степень описывает погрешность модели Лелиака при измерении модуля:

$$\begin{aligned} |B_0| &= |B_{изм}| - \frac{1}{|B_{изм}|} B_{изм}^T B_c + \underline{\underline{O}}(\varepsilon^2) = \\ &= |B_{изм}| - \frac{1}{|B_{изм}|} \left[B_{изм}^T B_{perm} + B_{изм}^T A^{ind} B_0 + B_{изм}^T A^{eddy} \frac{\partial B_0}{\partial t} \right] + \underline{\underline{O}}(\varepsilon^2). \end{aligned} \quad (13)$$

Важно отметить, что в правой части в выражениях для индуцированной и вихревой компонент можно заменить B_0 на $B_{изм}$, и погрешности этой замены не превзойдут ε^2 . Для получения компонент вектора $B_{изм}/|B_{изм}| = e_{изм}$ на практике используются измерения дополнительного векторного магнитометра. В линейном приближении

$$\begin{aligned} |B_0| &= |B_{изм}| - \frac{1}{|B_{изм}|} B_{изм}^T B_c + \underline{\underline{O}}(\varepsilon^2) = \\ &= |B_{изм}| - \frac{1}{|B_{изм}|} \left[B_{изм}^T B_{perm} + B_{изм}^T A^{ind} B_0 + B_{изм}^T A^{eddy} \frac{\partial B_0}{\partial t} \right] + \underline{\underline{O}}(\varepsilon^2). \end{aligned} \quad (14)$$

Стоит иметь в виду, что $|B_{изм}| - |B_0| \neq |B_c|$. Вторая степень малого параметра никак моделью Лелиака не учитывается. Интересно, что данная особенность не отражается в известных публикациях, посвященных магнитной компенсации.

Максимальная величина разницы между полем, скомпенсированным при ортогональной проекции, и истинным достигается в случае, когда вектор девиации ортогонален вектору поля. Можно показать, что максимальное значение квадратичного члена равно $\varepsilon^2/2$ с погрешностью не более ε^3 . Это одна из причин, почему датчик требуется установить по возможности дальше от источников магнитного влияния.

Получив параметры модели Лелиака, можно оценить теоретический предел точности компенсации, взяв квадрат отношения ее максимального значения к амплитуде внешнего поля. Чтобы удовлетворить точности 0,1 нТл, в идеале нужно, чтобы величина девиации не превышала 100 нТл при поле 50 000 нТл. (60 нТл при поле 20 000 нТл).

Анализируя [14], можно видеть, что симметричные коэффициенты матрицы A^{ind} входят всегда с одним и тем же коэффициентом, поэтому они неразличимы. Как следствие, эту матрицу можно подбирать как симметричную:

$$A_{ij}^{ind} = A_{ji}^{ind}, i \neq j. \quad (15)$$

Еще один фактор, влияющий на количество параметров, описывающих модель наведенного поля, – это степень изменчивости внешнего поля. В тех случаях, когда поле меняется на величину, сопоставимую с εB_0 , влияние этого изменения на наведенное поле не превосходит ε^2 и поэтому в рамках данной модели не может быть оценено.

Верны следующие равенства (с точностью до малых второго порядка):

$$\begin{aligned} e_{изм}^T A^{eddy} \frac{\partial B_{изм}}{\partial t} &= |B_{изм}| e_{изм}^T \bar{A}^{eddy} \frac{\partial e_{изм}}{\partial t} + d \frac{|B_{изм}|}{dt} (e_{изм}^T \bar{A}^{eddy} e_{изм} + k_1), \\ k_1 &= \text{tr} A^{eddy}, \end{aligned} \quad (16)$$

по аналогии с (6), tr – след матрицы.

$$\begin{aligned} B_{изм}^T \bar{A}^{ind} e_{изм} &= |B_{изм}| e_{изм}^T \bar{A}^{ind} e_{изм} + k_2 |B_{изм}|, \\ k_2 &= \text{tr} \bar{A}^{ind}. \end{aligned} \quad (17)$$

С учетом этого при малых изменениях внешнего поля

$$\begin{aligned} \frac{|B_{изм}| - |B_0|}{|B_{изм}|} &= e_{изм}^T b_{perm} + e_{изм}^T \bar{A}^{ind} e_{изм} + e_{изм}^T \bar{A}^{eddy} \frac{\partial e_{изм}}{\partial t} + b_{res}, \\ \bar{A}_{ij}^{ind} &= \bar{A}_{ji}^{ind}, \text{tr} \bar{A}^{ind} = 0, \text{tr} \bar{A}^{eddy} = 0, b_{perm}, \bar{A}^{ind}, \bar{A}^{eddy}, b_{res} = \text{const}. \end{aligned} \quad (18)$$

Появившаяся составляющая b_{res} , постоянная при малых изменениях поля, которая по величине может быть сопоставима с амплитудой наведенного поля, при незначительных изменениях внешнего поля неотличима от аномального поля.

С учетом имеющегося опыта, при оценке параметров наведенного поля в калибровочном эксперименте, поле изменяется на величину, сопоставимую с наведенным полем $\sim \varepsilon B_0$. Поэтому при такой процедуре корректно могут оцениваться максимум 16 параметров модели (18). Выделение соответствующих компонент в присутствии интенсивного аномального поля затруднительно, поскольку спектр аномального поля и спектр наведенного поля существенно пересекаются. Часть, вошедшая в (18) в виде аддитивной постоянной, может быть выражена через аномальное поле, если пренебречь величинами порядка $\varepsilon^2 B_0$:

$$b_{res} = \frac{1}{|B_{изм}|} \left((e_{изм}^T \bar{A}^{eddy} e_{изм} + k_1) \frac{d|B_a|}{dt} + k_2 |B_a| \right). \quad (19)$$

Влияние b_{res} проявляется только когда $|B_a|/|B_c| > 1$. Для оценки k_2 потребуется сторонняя информация об аномальном поле. Погрешность, с которой будет измерено аномальное поле при неизвестном k_2 , определяется величиной $|B_a|/|B_c|^2$.

Теоретически k_1 можно определить при прохождении через одну и ту же точку в разных направлениях так, что градиент поля в этих направлениях существенно различен. Однако в том случае, когда матрица вихревой составляющей наведенного поля хорошо обусловлена, величина градиента внешнего поля должна значительно превосходить скорость изменения поля, связанную с угловыми скоростями. При угловых скоростях порядка 0,1 рад/с производная поля в собственных осях составляет порядка 1000 нТл/с. При скорости 10 м/с это соответствует градиенту 5 нТл/м. Т.е., чтобы влияние k_2 проявилось, градиент должен составить величину порядка 100 нТл/м, что при расстоянии до магнитной поверхности 50 м отвечает аномалии порядка 5000 нТл размером порядка 100 м. Очевидно, что недооценка k_2 скажется только при работе в окрестности такого рода аномалий, что недопустимо в рассматриваемой задаче, а величина этой погрешности будет отличаться от $\varepsilon^2 B_0$ во столько раз, во сколько градиент превосходит изменение поля на характерных угловых скоростях.

Итак, наведенное поле в рамках линейной модели при измерении модуля индукции магнитного поля описывается 18-ю коэффициентами, из которых 16 целесообразно определять в калибровочном эксперименте в отсутствие значимого аномального поля согласно модели [19], а двумя другими [20], как правило, можно пренебречь, поскольку они проявляются только в сильно градиентных полях.

На основе модели [18] можно получить модель наведенного поля для системы, измеряющей градиент модуля магнитной индукции. Для измерения всех трех компонент вектора градиента необходимо использовать четыре скалярных датчика.

Модель [18] можно записать в тензорном виде (опуская индекс $изм$):

$$\frac{|B| - |B_0|}{|B|} = e_j b_{permj} + e_j \bar{A}_{jk}^{ind} e_k + e_j \bar{A}_{jk}^{eddy} e'_k + b_{res}. \quad (20)$$

Здесь по повторяющимся индексам j и k выполняется суммирование от 1 до 3. Взяв соответствующие разности, можно получить

$$\begin{aligned} \frac{1}{|B|} \nabla_i (|B| - |B_0|) &= e_j \nabla_i b_{permj} + e_j A_{ijk}^{ind} e_k + e_j A_{ijk}^{eddy} e'_k + b_{resi}, i = 1, 2, 3, \\ \nabla_i b_{permj} &= b_{permj(i)} - b_{permj(b)}, A_{ijk}^{ind} = \bar{A}_{jk(i)}^{ind} - \bar{A}_{jk(b)}^{ind}, A_{ijk}^{eddy} = \bar{A}_{jk(i)}^{eddy} - \bar{A}_{jk(b)}^{eddy}, \\ A_{ijk}^{ind} &= A_{ikj}^{ind}, \sum_{k=1}^3 A_{ikk}^{ind} = 0, \sum_{k=1}^3 A_{ikk}^{eddy} = 0 \\ b_{resi} &= b_{res(i)} - b_{res(b)} = \frac{1}{|B|} \left((e_j A_{ijk}^{eddy} e_k + k_{1(i)} - k_{1(b)}) \frac{d|B|}{dt} + (k_{2(i)} - k_{2(b)}) |B| \right) = \\ &= \frac{1}{|B|} \left((e_j A_{ijk}^{eddy} e_k + k_{1i}) \frac{d|B|}{dt} + k_{2i} |B| \right). \end{aligned} \quad (21)$$

Здесь индексом b обозначен некий базовый скалярный датчик, показания которого вычитаются из трех других (1, 2, 3) при вычислении градиента.

В этой модели, как и в случае наведенного поля при измерении модуля индукции, параметр b_{res} является постоянной величиной вдали от неподвижных магнитных масс, он изменяется только в сильно градиентных полях.

Таким образом, при измерении вектора градиента модуля магнитной индукции модель наведенного поля содержит $3 \cdot 18 = 54$ параметра, из которых на практике могут быть использованы только 48 коэффициентов, а шесть оставшихся коэффициентов вместе дают вклад, не отличимый от постоянной составляющей.

Заключение. На основе полученных моделей можно решать задачу совместного оценивания параметров поля носителя и констант, входящих в модель измерений, и тем самым решить задачу компенсации. Однако следует учитывать, что возможность обнаружения того или другого магнитовозмущающего объекта градиентным комплексом определяется не только глубиной компенсации поля носителя и чувствительностью применяемых датчиков, но и помехой, обусловленной нескомпенсированным влиянием вариаций поля – градиентной вариационной помехой. Амплитуду градиентной вариации можно приближенно оценить исходя из того, что влияние вариаций поля Земли в зоне измерений примерно одинаково для всех магнитных объектов (градиент генерального воздействия равен нулю). Влияние градиентной вариационной помехи, обусловленной каждым сторонним объектом, быстро убывает по мере удаления от него, однако в условиях существенной геологической неоднородности в зоне поиска воздействие может быть весьма значительным. На этом эффекте вариационной неоднородности поля основан даже метод геофизического изучения среды, известный как магнитовариационное зондирование [20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дикарев В.И., Заренков В.А., Заренков Д.В. Методы и средства обнаружения объектов в укрывающих средах. – СПб.: Наука и Техника, 2004. – 280 с.
2. Щербаков Г.Н. Обнаружение скрытых объектов. – М.: Арбат-Информ, 2004. – 144 с.
3. Щедрин А.И., Осипов И.Н. Металлоискатели для поиска кладов и реликвий. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 192 с.
4. Любимов В.В. Новые приборы для измерения градиента источников магнитного поля в различных средах. Препринт № 3 (1142). – М.: ИЗМИРАН, 2001. – 10 с.
5. Афанасьев Ю.В. Средства измерения магнитного поля. – М.: Энергия, 1999. – 204 с.
6. Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Павлов Б.В. Магнитоградиентные измерительные системы и комплексы: монография в 2-х т. Т. I. Принципы измерений и структура магнитоградиентных комплексов. – М.: ИПУ РАН, 2018. – 149 с.
7. Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Павлов Б.В., Тхоренко М.Ю. Магнитоградиентные измерительные системы и комплексы: монография в 2-х т. Т. II. Обработка информации и применение магнитоградиентных комплексов. – М.: ИПУ РАН, 2018. – 135 с.

8. *Вовенко Т.А., Волковицкий А.К., Павлов Б.В., Каршаков Е.В., Тхоренко М.Ю.* Модели и структура бортовых измерений пространственных физических полей // Проблемы управления. – 2015. – № 3. – С. 59-68.
9. *Chadebec O. et al.* A Review of Magnetostatic Moment Method // IEEE Transaction on Magnetics. – 2006. – 4. – P. 515-520.
10. *DeVoe H.* Optical properties of molecular aggregates. I. Classical model of electronic absorption and refraction // J. Chem. Phys. – 1964. – 41. – P. 393-400.
11. *Lakhtakia A.* Strong and Weak Forms of the Method of Moments and the Coupled Dipole Method for Scattering of Time-Harmonic Electromagnetic Fields // International Journal of Modern Physics C. – 1992. – 3. – P. 583-603.
12. *Alcaraz de la Osa R. et al.* Extended discrete dipole approximation and its application to bianisotropic media // Optics Express. – 2010. – 23. – P. 23865-23871.
13. *Kahnert F.M.* Numerical methods in electromagnetic scattering theory // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2003. – Vol. 79-80. – P. 775-824.
14. *Yurkin M.A., Hoekstra A.G.* The discrete dipole approximation: an overview and recent developments // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2007. – Vol. 106, No. 1-3. – P. 558-589.
15. *Jackson J.D.* Classical Electrodynamics. – New York: John Wiley & Sons Inc., 1999. – 808 p.
16. *Leliak P.* Identification and Evaluation of Magnetic-Field Sources of Magnetic Airborne Detector Equipped Aircraft // IRE Transactions on Aerospace and Navigational Electronics. – 1961. – Vol. ANE-8, No. 3. – P. 95-105.
17. *Groom R.L., Jia R. and Lo B.* Magnetic Compensation of Magnetic Noises Related to Aircraft's Maneuvers in Airborne Survey // Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. – 2004. – P. 1-8. – DOI: 10.4133/1.2923247.
18. *Jia J., Lo B. and Groom R.* Final Report on Improved Aeromagnetic Compensation // Report for Ontario Mineral Exploration Technology Program Project # P02-03-043. – 2004. – 65 p. – DOI: 10.13140/RG.2.1.2072.0402.
19. *Noriega G.* Aeromagnetic Compensation in Gradiometry – Performance, Model Stability, and Robustness // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2015. – Vol. 12, No. 1. – P. 117-121.
20. *Patella D., Mauriello P., Siniscalchi A.* A Sea-to-Ground Magnetovariational Method // Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1999. – P. 845-850.

REFERENCES

1. *Dikarev V.I., Zarenkov V.A., Zarenkov D.V.* Metody i sredstva obnaruzheniya ob'ektov v ukryvayushchikh sredakh [Methods and means of detecting objects in hiding environments]. St. Petersburg: Nauka i Tekhnika, 2004, 280 p.
2. *Shcherbakov G.N.* Obnaruzhenie skrytykh ob'ektov [Detection of hidden objects]. Moscow: Arbat-Infom, 2004, 144 p.
3. *Shchedrin A.I., Osipov I.N.* Metalloiskateli dlya poiska kladov i relikviy [Metal detectors for searching for treasures and relics]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2001, 192 p.
4. *Lyubimov V.V.* Novye pribory dlya izmereniya gradienta istochnikov magnitnogo polya v razlichnykh sredakh. Preprint № 3 (1142) [New devices for measuring the gradient of magnetic field sources in various media. Preprint No. 3 (1142)]. Moscow: IZMIRAN, 2001, 10 p.
5. *Afanas'ev Yu.V.* Sredstva izmereniya magnitnogo polya [Magnetic field measuring instruments]. Moscow: Energiya, 1999, 204 p.
6. *Volkovitskiy A.K., Karshakov E.V., Pavlov B.V.* Magnitogradientnye izmeritel'nye sistemy i komplekсы: monografiya [Magnetogradient measuring systems and complexes: a monograph v 2-kh t. T. I. Printsipy izmereniy i struktura magnitogradientnykh kompleksov [Magnetogradient measuring systems and complexes: a monograph in two vol. Vol. 1. Measurement principles and structure of magnetogradient complexes]. Moscow: IPU RAN, 2018, 149 p.
7. *Volkovitskiy A.K., Karshakov E.V., Pavlov B.V., Tkhorenko M.Yu.* Magnitogradientnye izmeritel'nye sistemy i komplekсы: monografiya v 2-kh t. T. II. Obrabotka informatsii i primenenie magnitogradientnykh kompleksov [Magnetogradient measuring systems and complexes: a monograph in two vol. Vol. 2. Information processing and application of magnetogradient complexes]. Moscow: IPU RAN, 2018, 135 p.
8. *Vovenko T.A., Volkovitskiy A.K., Pavlov B.V., Karshakov E.V., Tkhorenko M.Yu.* Modeli i struktura bortovykh izmereniy prostranstvennykh fizicheskikh poley [Models and structure of on-board measurements of spatial physical fields], *Problemy upravleniya* [Control sciences], 2015, No. 3, pp. 59-68.
9. *Chadebec O. et al.* A Review of Magnetostatic Moment Method, *IEEE Transaction on Magnetics*, 2006, 4, pp. 515-520.

10. DeVoe H. Optical properties of molecular aggregates. I. Classical model of electronic absorption and refraction, *J. Chem. Phys.*, 1964, 41, pp. 393-400.
11. Lakhtakia A. Strong and Weak Forms of the Method of Moments and the Coupled Dipole Method for Scattering of Time-Harmonic Electromagnetic Fields, *International Journal of Modern Physics C*, 1992, 3, pp. 583-603.
12. Alcaraz de la Osa R. et al. Extended discrete dipole approximation and its application to bianisotropic media, *Optics Express*, 2010, 23, pp. 23865-23871.
13. Kahnert F.M. Numerical methods in electromagnetic scattering theory, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2003, Vol. 79-80, pp. 775-824.
14. Yurkin M.A., Hoekstra A.G. The discrete dipole approximation: an overview and recent developments, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2007, Vol. 106, No. 1-3, pp. 558-589.
15. Jackson J.D. Classical Electrodynamics. New York: John Wiley & Sons Inc., 1999, 808 p.
16. Leliak P. Identification and Evaluation of Magnetic-Field Sources of Magnetic Airborne Detector Equipped Aircraft, *IRE Transactions on Aerospace and Navigational Electronics*, 1961, Vol. ANE-8, No. 3, pp. 95-105.
17. Groom R.L., Jia R. and Lo B. Magnetic Compensation of Magnetic Noises Related to Aircraft's Maneuvers in Airborne Survey, *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 2004, pp. 1-8. DOI: 10.4133/1.2923247.
18. Jia J., Lo B. and Groom R. Final Report on Improved Aeromagnetic Compensation, *Report for Ontario Mineral Exploration Technology Program Project # P02-03-043*, 2004, 65 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.2072.0402.
19. Noriega G. Aeromagnetic Compensation in Gradiometry – Performance, Model Stability, and Robustness, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 117-121.
20. Patella D., Mauriello P., Siniscalchi A. A Sea-to-Ground Magnetovariational Method, *Offshore Technology Conference, Houston, Texas*, 1999, pp. 845-850.

Павлов Борис Викторович – Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук; e-mail: pavlov@ipu.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89168325170; д.т.н.; г.н.с.

Гольдин Дмитрий Алексеевич – Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук; e-mail: goldind@ipu.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89036643884; к.т.н.; с.н.с.

Третьякова Екатерина Алексеевна – Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН); e-mail: ekaterina_tretikova@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79379960028; м.н.с.

Pavlov Boris Viktorovich – V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; e-mail: pavlov@ipu.ru; Moscow, Russia; phone +79168325170; dr. of eng. sc.; chief researcher.

Goldin Dmitry Alekseevich – V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; e-mail: goldind@ipu.ru; Moscow, Russia; phone: +79036643884; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Tretyakova Ekaterina Alekseevna – V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences (ICS RAS); e-mail: ekaterina_tretikova@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79379960028; junior researcher.

УДК 621.396

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-229-240

А.А. Черкасова, А.Ю. Шатилов

САМОПОДСТРАИВАЮЩАЯСЯ МНОГОКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА СЛЕЖЕНИЯ ЗА ФАЗОЙ СИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

Спутниковая навигационная аппаратура зачастую работает в условиях априорной неопределенности параметров взаимной динамики между передатчиком и потребителем и отношения сигнал/шум принимаемых сигналов спутниковых радионавигационных систем. Классические оптимальные системы слежения за фазой сигнала в таких условиях оказываются не оптимальны по критерию минимума дисперсии ошибки. Более того, резкое изменение отношения сигнал/шум или

динамики, может приводить в такой системе к срыву слежения. Для работы в подобных условиях синтезирована самоподстраивающаяся многоканальная система слежения за фазой сигнала. Синтез проведен с использованием методов статистической теории синтеза оптимальных радиотехнических систем. Адаптивность к меняющейся мощности принимаемого сигнала достигается за счет включения отношения сигнал/шум [дБГц] в вектор оцениваемых параметров фильтра. Адаптивность к интенсивности динамики изменения фазы достигается за счет применения системы многоканальной фильтрации. Проведено статистическое моделирование самоподстраивающейся многоканальной системы слежения за фазой с комплексным алгоритмом слежения за задержкой огибающей сигнала спутниковых радионавигационных систем. Определена чувствительность слежения за фазой в различных динамических условиях. Самоподстраивающаяся многоканальная система слежения за фазой с комплексным алгоритмом слежения за задержкой огибающей сигнала способна в условиях низкой динамики (обусловленной только динамикой опорного генератора) обрабатывать скачок отношения сигнал/шум с 50 до 10 дБГц и обратно без потери слежения за фазой. Синтезированная система способна сохранять слежение за фазой при скачкообразных переходах динамики между низкой и высокой (обусловленной синусоидальным ускорением 10g и синусоидальным рывком 10 g/s) динамикой при отношении сигнал/шум 24 дБГц. Таким образом, в реальных условиях, когда динамика изменения фазы и отношения сигнал/шум принимаемых сигналов меняются непредсказуемым образом, самоподстраивающаяся многоканальная система слежения за фазой сигнала сохраняет слежение за фазой в гораздо более широком диапазоне условий, чем классическая оптимальная система слежения за фазой сигнала.

Самоподстраивающаяся многоканальная система слежения за фазой; адаптивный подход; слежение за фазой сигналов глобальных навигационных систем; адаптация к отношению сигнал/шум; адаптация к динамике процесса фазы.

A.A. Cherkasova, A.Y. Shatilov

MULTYCHANNEL ADAPTIVE PHASE LOCK LOOP SYSTEM FOR GNSS RECEIVER

Satellite navigation equipment often operates under conditions of a priori uncertainty of the parameters of the mutual dynamics between the transmitter and the consumer and the signal-to-noise ratio of the received signals of satellite radio navigation systems. Classical Bayesian algorithms for Phase lock loop system require a priori knowledge about the parameters of the phase process dynamics and the signal-to-noise ratio (SNR) of the received signals. As a result, the operation of such algorithms under conditions other than that a priori specified is not optimal to the criterion of minimum error variance. Moreover, a sudden change in the signal-to-noise ratio or dynamics can lead to a tracking failure in such a system. The purpose of this work is to develop an optimal phase tracking system that is adaptive to the dynamics of the phase process and the signal-to-noise ratio in order to maintain phase tracking in the widest possible range of operating conditions while tracking global navigation satellite system signal. An adaptive multichannel phase lock loop system has been synthesized as a result of formulation and solution of signal processing problem in terms of the statistical synthesis theory. Adaptivity to the changing power of the received signal is achieved by including the signal-to-noise ratio [dBHz] in the vector of estimated filter parameters. Adaptability to the intensity of the phase change dynamics is achieved through the use of a multi-channel filtration system. Statistical modeling of an adaptive multichannel phase lock loop tracking system with a complex algorithm for tracking the code delay of the signal of satellite radio navigation systems has been carried out. The values of the sensitivity of phase tracking under various dynamic conditions are determined. The adaptive multichannel phase lock loop system is able to withstand an signal-to-noise ratio jump from 50 to 10 dBHz and back without loss of phase tracking in low dynamics conditions (only the drift of the reference quartz oscillator). The AMPLL system is able to withstand abrupt transitions of dynamics between low and high (the sinusoidal acceleration 10g and sinusoidal jerk 10 g/s) without loss of phase tracking under the 24 dBHz signal-to-noise ratio. Thus, in real conditions, when the dynamics of the GNSS receiver and the SNRs of the received signals change in an unpredictable way, the AMPLL system keep tracking in a much wider range of conditions than the non-adaptive PLL.

Adaptive phase lock loop system; global navigation satellite signal; phase tracking; adaptive to the phase process dynamics and the SNR.

Введение. В аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем (АП СРНС) для построения следящих систем как правило, не применяются оптимальные байесовские алгоритмы и достаточно редко применяются квазиоптимальные байесовские алгоритмы [1, 2].

Чаще всего для построения следящих систем в АП СРНС применяются адаптивные робастные алгоритмы [3–5], основанные на текущем оценивании энергетики принимаемых сигналов и взаимной динамики передатчика и приемника. Данные алгоритмы не позволяют достичь потенциальных характеристик чувствительности и точности.

Для достижения близких к потенциальным характеристик точности и чувствительности слежения за фазой в условиях отсутствия информации о динамике процесса фазы от других измерителей наиболее эффективен адаптивный подход [8–15].

Цель – используя методы статистической теории синтеза оптимальных радиотехнических систем синтезировать систему слежения за фазой сигналов СРНС, адаптивную к динамике процесса фазы и отношению сигнал/шум (с/ш) для сохранения слежения за фазой в как можно более широком диапазоне условий работы.

Постановка задачи. На вход приемника в дискретном времени поступает реализация наблюдений сигнала, который в интересах упрощения синтеза будем полагать гармоническим.

$$y_{k,i} = s_{k,i} + n_{k,i}, y_k = [y_{k,0} \dots y_{k,N-1}]^T, Y_0^k = [y_0^T, y_1^T \dots y_k^T], \quad (1)$$

$$s_{k,i} = A_k \cos \left\{ 2\pi f_o t_{k,i} + \varphi_k + \omega_k i T_d + v_k (\alpha_{k-1}) \frac{(iT_d)^2}{2} \right\},$$

где $y_{k,i}$ – наблюдения входного сигнала, A_k – амплитуда сигнала, φ_k – фаза [рад], ω_k – частота [рад/с], v_k – ускорение фазы [рад/с²], α_{k-1} – неизвестный переменный параметр интенсивности динамических флуктуаций фазы, который имеет физический смысл среднеквадратического ускорения между передатчиком и приемником и выражен в [м/с²], f_o – несущая частота. Двойная шкала времени $t_{k,i} = kT + iT_d$, $k = 0, 1, \dots$ – индексы моментов редкой шкалы времени с шагом T ; $i = 0, N-1$ – индексы моментов частой шкалы времени с шагом T_d , для описания наблюдений; $N = T/T_d$, $n_{k,i}$ – дискретный белый гауссовский шум (ДБГШ) с нулевым мат. ожиданием (МО) и дисперсией.

Амплитуда сигнала A_k неизвестна и меняется со временем. Т.к. на практике уровень шума приемника известен и поддерживается на постоянном уровне адаптивным квантователем, зная отношение мощности сигнала P_s к односторонней спектральной плотности внутреннего шума приемника N_0 , выраженное в дБГц можно вычислить амплитуду сигнала как

$$A_k = \sqrt{4\sigma_n^2 T 10^{0.1 q_k}}, q_k = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{N_0} \right). \quad (2)$$

В вектор состояния фильтра включено именно отношение с/ш в дБГц, т.к. его можно описать гауссовским марковским процессом. Пусть отношение с/ш представлено винеровским процессом. Тогда модель изменения с/ш имеет вид

$$q_k = q_{k-1} + \zeta_{k-1} T, \quad (3)$$

где ζ_{k-1} – ДБГШ с нулевым МО и известным СКО σ_ζ .

Модель изменения фазы зададим марковским процессом третьего порядка

$$\varphi_k = \varphi_{k-1} + \omega_{k-1} T + \frac{v_{k-1} T^2}{2}, \quad (4)$$

$$\omega_k = \omega_{k-1} + v_{k-1} T + \xi_{\omega,k-1}, v_k = v_{k-1} e^{-\beta T} + \xi_{v,k-1},$$

где ξ_ω – ДБГШ с нулевым МО и известным среднеквадратическим отклонением (СКО) σ_ω – формирующий шум, описывающий нестабильность частоты опорного генератора потребителя и генератора спутника, ξ_v – ДБГШ с нулевыми МО и СКО $\sqrt{1 - e^{-2\beta T}} \sigma_{v,k}$, β [1/с] – ширина спектра флуктуаций компоненты v_k .

Представим $\sigma_{v,k}$ как

$$\sigma_{v,k} = \frac{2\pi f_o}{c} \alpha_{k-1}, \quad (5)$$

где c – скорость света, α_{k-1} [м/с²] – переменный параметр, описывающий интенсивность динамических флуктуаций фазы.

Параметр α_{k-1} имеет физический смысл среднеквадратического ускорения между передатчиком и приемником и выражен в $[м/с^2]$. Примем следующую модель изменения параметра α_{k-1} . Полагаем, что α_{k-1} может принимать одно из конечного числа значений $\alpha_{k-1}^j, j = \overline{1, M}$, а изменение данного параметра во времени описывается марковской цепью с известными вероятностями перехода $P(\alpha_{k-1}^j | \alpha_{k-2}^l)$ от значения l в момент времени $k-2$ к значению j в момент времени $k-1$ и начальными вероятностями $P(\alpha_0^j), j = \overline{1, M}, \sum_{j=1}^M P(\alpha_0^j) = 1$.

Рассмотрим задачу фильтрации фазы в тактовые моменты времени $t_{k,0}, k = 1, 2, \dots$, принимая во внимание априорную модель для случайных процессов $q_k, \varphi_k, \omega_k, \nu_k$ и марковскую цепь α_{k-1}^j с известными статистическими характеристиками и наблюдения **Ошибка! Источник ссылки не найден.** на фоне белого гауссовского шума.

Исходя из вышесказанного, вектор информативных параметров имеет вид

$$x_k = [q_k \ \varphi_k \ \omega_k \ \nu_k(\alpha_{k-1})]^T. \quad (6)$$

Параметр α_{k-1} (интенсивность динамических флуктуаций фазы) не представляет интереса, поэтому будем его называть *неинформативным* параметром.

Учитывая (4), (3), (6), оцениваемый процесс описывается следующим линейным разностным уравнением

$$x_k = Fx_{k-1} + G(\alpha_{k-1})\xi_{k-1}, \quad (7)$$

где $x_{k=0}$ – векторная гауссовская случайная величина с известным МО x_0 и матрицей дисперсий $D_{x,0}$, ξ_{k-1} – ДБГШ с нулевым МО и единичной корреляционной матрицей $D_\xi = I_{3 \times 3}$, $F, G(\alpha_{k-1})$ – известные матрицы,

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & (1 - \beta T) \end{bmatrix}, G(\alpha_{k-1}) = \begin{bmatrix} T\sigma_\zeta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\omega & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2\beta T} \frac{2\pi f_0}{c} \alpha_{k-1} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Синтез общего алгоритма самоподстраивающейся многоканальной системы фильтрации фазы. Известно [8, 9, 13] общее байесовское решение задачи оптимальной адаптивной фильтрации векторного марковского процесса x_k при наличии случайного неинформативного параметра α , неизменного во времени ($\alpha_{k-1} = \alpha_k$)

$$\hat{x}_k = \sum_{j=1}^M \hat{x}_k(\alpha^j) P(\alpha^j | Y_0^k), p(\alpha^j | Y_0^k) = \frac{p(y_k | Y_0^{k-1}, \alpha^j) p(\alpha^j | Y_0^{k-1})}{\sum_{j=1}^M p(y_k | Y_0^{k-1}, \alpha^j) p(\alpha^j | Y_0^{k-1})}, \quad (9)$$

где $\hat{x}_k(\alpha^j)$ – условная оптимальная оценка вектора x_k при фиксированном значении α^j

$$\hat{x}_k(\alpha^j) = \int_{-\infty}^{\infty} x_k p(x_k | \alpha^j, Y_0^k) dx_k, \quad (10)$$

$$p(x_k | \alpha^j, Y_0^k) = C p(y_k | x_k, \alpha^j) \int_{-\infty}^{\infty} p(x_k | x_{k-1}, \alpha^j) p(x_{k-1} | \alpha^j, Y_0^{k-1}) dx_{k-1},$$

где C – нормировочная константа, $p(y_k | x_k, \alpha^j)$ – одношаговая функция правдоподобия, $p(x_k | x_{k-1}, \alpha^j)$ – плотность вероятности (ПВ) перехода марковского процесса x .

В англоязычной литературе [14] данное решение относится к алгоритмам многоальтернативной фильтрации первого поколения (First Generation Multiple-Model Methods) и получило название Autonomous Multiple Model (AMM) method.

Для решения задачи оптимальной адаптивной фильтрации векторного марковского процесса x_k в случае когда α изменяется во времени ($\alpha_{k-1} \neq \alpha_k$) и является случайным неинформативным параметром, широкое распространение получил подход в англоязычной литературе получивший название Cooperating Multiple Model (CMM) method [14]. Данный подход относится к алгоритмам многоальтернативной фильтрации второго поколения (Second Generation Multiple-Model Methods). В нашей задаче число альтернатив равно M . В этом случае для формирования результирующей оценки $\hat{x}_k$ в момент времени k , опти-

мальный алгоритм СММ, должен сформировать M^k оценок $\hat{x}_k(\alpha_{k-1}^j)$, учитывающих все возможные реализации последовательностей состояний системы за время до k включительно, а также оценить их вероятности. Причем число возможных комбинаций состояний растет во времени экспоненциально. Потому практическая реализация оптимального алгоритма СММ не представляется возможной.

В данной работе использован субоптимальный алгоритм, получивший в английской литературе название Interacting Multiple Model (IMM) [15]. Данный алгоритм предусматривает формирование канальных оценок $\hat{x}_k(\alpha^j)$ (10) вектора состояния при фиксированных, неизменных во времени значениях α^j , а итоговая оценка $\hat{x}_k$ (9) формируется в результате усреднения канальных оценок $\hat{x}_k(\alpha^j)$ с использованием апостериорных вероятностей $P(\alpha^j = \alpha_{k-1}^j | Y_0^k)$, учитывающих случайные изменения параметра α_{k-1}^j в тактовые моменты времени, т.е.

$$\hat{x}_k = \sum_{j=1}^M \hat{x}_k(\alpha^j) P(\alpha_{k-1}^j | Y_0^k), \quad (11)$$

Для формирования результирующей оценки $\hat{x}_k$ на каждом такте работы, субоптимальный алгоритм IMM, должен сформировать всего M оценок $\hat{x}_k(\alpha^j)$ и оценить их вероятности. Представим результат вывода уравнений для АПВ $P(\alpha_{k-1}^j | Y_0^k)$

$$P(\alpha_{k-1}^j | Y_0^k) = \frac{\tilde{P}(\alpha_{k-1}^j | Y_0^k)}{\sum_{j=1}^M \tilde{P}(\alpha_{k-1}^j | Y_0^k)}, \quad (12)$$

$$\tilde{P}(\alpha_{k-1}^j | Y_0^k) = p(y_k | Y_0^{k-1}, \alpha^j) \sum_{l=1}^M P(\alpha_{k-1}^j | \alpha_{k-2}^l) P(\alpha_{k-2}^l | Y_0^{k-1}).$$

Уравнения (10)-(12) полностью описывают общий алгоритм многоканальной фильтрации процесса x_k , где в каждом канале формируется условная оценка $\hat{x}_k(\alpha^j)$. Применим их для решения поставленной задачи.

Алгоритм фильтрации в одном канале. Описание наблюдений вида (1) и динамики вектора состояний в виде (6), (7) позволяет записать алгоритм для формирования условной оценки $\hat{x}_k(\alpha^j)$ при фиксированном и неизменном во времени параметре α^j , в виде расширенного фильтра Калмана [8].

Этап экстраполяции:

$$\tilde{x}_k(\alpha^j) = F \cdot \hat{x}_{k-1}(\alpha^j), \tilde{D}_{x,k}(\alpha^j) = F \tilde{D}_{x,k-1}(\alpha^j) F^T + G(\alpha^j) D_\xi G(\alpha^j)^T. \quad (13)$$

Этап коррекции:

$$\hat{D}_{x,k}(\alpha^j) = (\tilde{D}_{x,k}(\alpha^j)^{-1} + W_k)^{-1}, \hat{x}_k(\alpha^j) = \tilde{x}_k(\alpha^j) + \hat{D}_{x,k}(\alpha^j) \cdot u_{d,k}, \quad (14)$$

$u_{d,k}$ – векторный дискриминатор

$$u_{d,k} = \frac{\tilde{A}_k}{\sigma_n^2} \left[\frac{\ln(10^{0.1})}{2} \left[\sum_{i=0}^{N-1} y_{k,i} \tilde{s}_{k,i}^I - \frac{\tilde{A}_k N}{2} \right] - \sum_{i=0}^{N-1} y_{k,i} \tilde{s}_{k,i}^Q - \sum_{i=0}^{N-1} i T_d y_{k,i} \tilde{s}_{k,i}^Q - \sum_{i=0}^{N-1} \frac{(iT_d)^2}{2} y_{k,i} \tilde{s}_{k,i}^Q \right], \quad (15)$$

где $\tilde{A}_k = \sqrt{4\sigma_n^2 T_d 10^{0.1 \tilde{q}_k}}$,

$$\tilde{s}_{k,i}^I = \cos\{2\pi f_o t_{k,i} + \tilde{\varphi}_k + \tilde{\omega}_k i T_d + \tilde{v}_k \frac{(iT_d)^2}{2}\},$$

$$\tilde{s}_{k,i}^Q = \sin\{2\pi f_o t_{k,i} + \tilde{\varphi}_k + \tilde{\omega}_k i T_d + \tilde{v}_k \frac{(iT_d)^2}{2}\}.$$

W_k – матрица весов наблюдений

$$W_k = \frac{\tilde{A}_k^2}{2\sigma_n^2} \begin{vmatrix} \frac{N(\ln(10^{0.1}))^2}{4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N & \sum_{i=0}^{N-1} iT_d & \sum_{i=0}^{N-1} \frac{(iT_d)^2}{2} \\ 0 & \sum_{i=0}^{N-1} iT_d & \sum_{i=0}^{N-1} (iT_d)^2 & \sum_{i=0}^{N-1} \frac{(iT_d)^3}{2} \\ 0 & \sum_{i=0}^{N-1} \frac{(iT_d)^2}{2} & \sum_{i=0}^{N-1} \frac{(iT_d)^3}{2} & \sum_{i=0}^{N-1} \frac{(iT_d)^4}{4} \end{vmatrix}. \quad (16)$$

Выражения (8)-(16) описывают работу фильтра в одном канале, который настроен на формирование оценки $\hat{x}_k(\alpha^j)$ при заданном параметре интенсивности динамики фазы α^j .

Расчет канальных весов. Исходной информацией для взвешивания оценок из разных каналов является плотность вероятности $p(y_k|Y_0^{k-1}, \alpha^j)$, играющая ту же роль, что одношаговая функция правдоподобия в уравнении Стратоновича для дискретного времени. Наблюдения y_k не зависят явным образом от Y_0^{k-1} , а зависят только от текущего значения информативного процесса x_k . Но в отличие от одношаговой функции правдоподобия здесь значение информативного процесса x_k неизвестно. Тем не менее, по наблюдениям на предыдущих шагах Y_0^{k-1} и в предположении, что параметр динамики принимает конкретное, неизменное во времени, значение α^j , можно сформировать экстраполированную оценку информативного процесса x_k , которая определена в (13). А по экстраполированной оценке $\tilde{x}_k(\alpha^j)$, вобравшей в себя всю информацию о предыдущих наблюдениях Y_0^{k-1} , можно спрогнозировать y_k через $s_k(\tilde{x}_k(\alpha^j))$. Поэтому ПВ $p(y_k|Y_0^{k-1}, \alpha^j)$ эквивалентна ПВ $p(y_k|\tilde{x}_k, \alpha^j)$, которую можно представить следующим образом

$$p(y_k|\tilde{x}_k, \alpha^j) = \frac{1}{(2\pi \det(D_{y,k}(\alpha^j)))^{N/2}} \times \exp\left\{-\frac{1}{2}(y_k - s_k(\tilde{x}_k(\alpha^j)))D_{y,k}(\alpha^j)^{-1}(y_k - s_k(\tilde{x}_k(\alpha^j)))\right\}, \quad (17)$$

где

$$D_{y,k}(\alpha^j) = D_{\zeta,k} + D_n = \frac{\partial s_k(\tilde{x}(\alpha^j))}{\partial x_k} \tilde{D}_{x,k}(\alpha^j) \left(\frac{\partial s_k(\tilde{x}(\alpha^j))}{\partial x_k} \right)^T + D_n. \quad (18)$$

Упрощение расчета канальных весов. Размерность вектора наблюдений y_k равна N , а размерность матрицы $D_{y,k}(\alpha^j)$ составляет $N \times N$. На практике величина N может составлять десятки тысяч. Это ведет к серьезным сложностям при практической реализации алгоритма. Т.к. формирование канальных оценок производится при фиксированном и неизменном во времени параметре α^j , данную проблему можно преодолеть, перейдя к эквивалентной линеаризованной системе фильтрации [16].

На вход эквивалентной линеаризованной системы j -го канального фильтра поступают эквивалентные наблюдения вида $y_{\text{эKB},k} = x_k + n_{\text{эKB},k}$. В такой системе плотности вероятности $p(y_k|\tilde{x}_k, \alpha^j)$ будет соответствовать плотность вероятности $p(y_{\text{эKB},k}|\tilde{x}_k, \alpha^j)$. По аналогии с (17)

$$p(y_{\text{эKB},k}|\tilde{x}_k, \alpha^j) = \frac{1}{(2\pi \det(D_{\text{эKB},k}(\alpha^j)))^{N/2}} \times \exp\left\{-\frac{1}{2}(y_{\text{эKB},k} - \tilde{x}_k(\alpha^j))D_{\text{эKB},k}(\alpha^j)^{-1}(y_{\text{эKB},k} - \tilde{x}_k(\alpha^j))\right\} \quad (19)$$

где

$$D_{\text{эKB},k}(\alpha^j) = W_k^{-1} + \tilde{D}_{x,k}(\alpha^j), (y_{\text{эKB},k} - \tilde{x}_k(\alpha^j)) = W_k^{-1}u_{d,k} \quad (20)$$

Размерность вектора эквивалентных наблюдений $y_{\text{эkv},k}$ равна 4, а размерность матрицы дисперсий $D_{\text{эkv},k}(\alpha^j)$ равна 4×4 , поэтому гораздо проще рассчитать $p(y_{\text{эkv},k} | \tilde{x}_k, \alpha^j)$ вместо $p(y_k | Y_0^{k-1}, \alpha^j)$.

Самоподстраивающаяся многоканальная система слежения за фазой с комплексным алгоритмом системы слежения за задержкой сигнала СРНС. Выражения (6), (9), (12), (8)-(16) и (19)-(20) полностью определяют алгоритм самоподстраивающейся многоканальной системы слежения за фазой сигнала (СМССФ). Однако, некорректно рассматривать систему слежения за фазой без учета работы системы слежения за задержкой (ССЗ). В АП СРНС как правило используется комплексный алгоритм слежения за задержкой огибающей, с поддержкой доплеровским смещением частоты радиосигнала от системы слежения за фазой.

Учитывая наличие дальномерного кода, наблюдения сигнала в дискретном виде на входе приемника можно записать следующим образом

$$y_{k,i} = h_{\text{ок}}(t_{k,i} - \tau_k^{\text{code}}) s_{k,i} + n_{k,i}, \quad (21)$$

где $h_{\text{ок}}(t_{k,i} - \tau_k)$ – модуляция дальномерным кодом, τ_k – задержка кода сигнала СРНС.

Выразив приращение задержки на интервале $t_{k-1} \dots t_k$ через приращение фазы на том же интервале, можно представить модель изменения задержки как:

$$\tau_k = \tau_{k-1} - \frac{(\hat{\varphi}_k - \hat{\varphi}_{k-1})}{2\pi f_0} + \xi_{\tau,k-1}, \quad (22)$$

где $\xi_{\tau,k-1} = \delta\varphi_{k-1} - \delta\varphi_k + \Delta_{\text{ион},k}$, $\Delta_{\text{ион},k}$ – поправка, обусловленная влиянием ионосферы, $\delta\varphi_{k-1}$, $\delta\varphi_k$ – ошибки оценивания фазы. Будем приближенно считать, что $\xi_{\tau,k-1}$ – ДБГШ с нулевым МО и СКО σ_{τ} .

Использование модели наблюдений сигнала (21) и модели изменения задержки (22) дает следующий алгоритм слежения за задержкой сигнала

$$\tilde{\tau}_k = \hat{\tau}_{k-1} - \frac{(\hat{\varphi}_k - \hat{\varphi}_{k-1})}{2\pi f_0}, \quad \hat{\tau}_k = \tilde{\tau}_k + K_1 u_{\text{д},\tau,k}, \quad (23)$$

где K_1 – коэффициент фильтра 1-го порядка, $u_{\text{д},\tau,k}$ – сигнал на выходе дискриминатора задержки огибающей.

Дискриминатор задержки огибающей, в случае когерентного приема, сигнала имеет вид, представленный в [20]

$$u_{\text{д},\tau,k} = -2 \cdot \frac{\Delta\tau}{\hat{A}_{kN}} (I_E^{\text{CC3}} - I_L^{\text{CC3}}), \quad (24)$$

где $\Delta\tau$ – расстройка компонент I_E^{CC3} и I_L^{CC3} по задержке,

$$\begin{aligned} I_E^{\text{CC3}} &= \sum_{i=0}^{N-1} y_{k,i} \tilde{A}_k h_{\text{ок}}(t_{k,i} - \tilde{\tau}_k + \Delta\tau) \tilde{s}_{k,i}^I, \\ I_L^{\text{CC3}} &= \sum_{i=0}^{N-1} y_{k,i} \tilde{A}_k h_{\text{ок}}(t_{k,i} - \tilde{\tau}_k - \Delta\tau) \tilde{s}_{k,i}^I. \end{aligned} \quad (25)$$

При формировании опорных сигналов для корреляционных сумм I_E и I_L используется экстраполированная оценка задержки, полученная от ССЗ. Экстраполированные оценки амплитуды, фазы, частоты и ускорения фазы в нашем случае получены от СМССФ.

Система СМССФ с комплексным алгоритмом ССЗ с поддержкой скорости изменения кодовой задержки от СМССФ представлена на рис. 1.

Условия статистического моделирования. Синтезированная СМССФ с комплексным алгоритмом ССЗ – сложная многомерная система. Основным методом исследования такого рода систем это статистическое моделирование.

При моделировании выбраны следующие параметры. Входной сигнал моделируется в частой шкале времени с периодом дискретизации $T_d = 100$ мкс. Оценка параметров сигнала в модели производится в более редкой шкале времени с шагом дискретизации $T = 20$ мс.

Ширина спектра флуктуаций ускорения фазы ν_k принята равной $\beta = 1$ с⁻¹. СКО формирующего шума для отношения с/ш принято равным $\sigma_{\zeta} = 20$ дБГц/с.

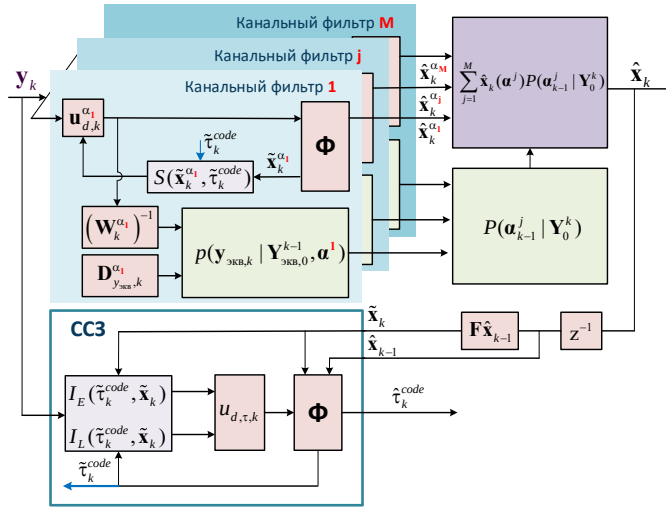


Рис. 1. СМССФ с комплексным алгоритмом ССЗ с поддержкой скорости изменения кодовой задержки от СМССФ

Динамика опорного генератора (ОГ) в модели формируется по записи процесса фазы реального термокомпенсированного опорного генератора с девиацией Аллана, приближенно равной $A_{dev} \approx 1,5 \times 10^{-10}$ (при времени осреднения $\tau = 0,01 - 40$ с). Запись получена по методу [19]. СКО формирующего шума, описывающего нестабильность частоты опорного генератора потребителя, рассчитывается через девиацию Аллана как

$$\sigma_\omega = 2\pi \cdot f_0 A_{dev} = 1.5 \text{ рад/с.} \quad (26)$$

Задан следующий набор из $M=10$ значений среднеквадратического ускорения α между передатчиком и приемником (от 0.01 до 43 [м/с²]), который покрывает практически весь диапазон ускорений реальных объектов применения. Распределение вероятностей перехода $P(\alpha_{k-1}^j | \alpha_{k-2}^l)$, считается стационарным и задано в виде таблицы.

Для моделирования ССЗ с поддержкой скорости изменения кодовой задержки от СМССФ использованы следующие параметры. Эквивалентная шумовая полоса ССЗ ΔF_t задана равной 0.1 Гц. Расстройка по задержке $\Delta \tau$ задана равной половине символа дальномерного кода $\tau_{симв,ДК}$. Частота следования символов дальномерного кода (ДК) задана равной 0.511 МГц и соответствует частоте символов ДК сигнала L1OF системы ГЛОНАСС.

При моделировании ССЗ использован статистический эквивалент коррелятора [20] $\rho(*)$ – нормированная автокорреляционная функция (АКФ) для BPSK сигнала.

Рассогласование по задержке приводит к снижению отклика полезного сигнала на выходе коррелятора пропорционально $\rho(\delta\tau_k)$ ($\rho(*)$ -нормированная автокорреляционная функция). При формировании корреляционных сумм I_k в каналах СМССФ, рассогласование по задержке учтено следующим образом

$$\begin{aligned} I_k &= \sum_{i=0}^{N-1} (\rho(\delta\tau_k) s_{k,i} + n_{k,i}) \tilde{s}_{k,i}^I, \\ Q_k &= \sum_{i=0}^{N-1} (\rho(\delta\tau_k) s_{k,i} + n_{k,i}) \tilde{s}_{k,i}^Q, \\ Q'_k &= \sum_{i=0}^{N-1} iT_d (\rho(\delta\tau_k) s_{k,i} + n_{k,i}) \tilde{s}_{k,i}^Q, \\ Q''_k &= \sum_{i=0}^{N-1} \frac{(iT_d)^2}{2} (\rho(\delta\tau_k) s_{k,i} + n_{k,i}) \tilde{s}_{k,i}^Q. \end{aligned} \quad (27)$$

Скорость изменения разности между кодовой и фазовой задержками в ионосфере задана равной 4 м/с.

Результаты исследования чувствительности слежения за фазой. С помощью статистического моделирования проводится сравнение работы двух систем: СМССФ и СМССФ с комплексным алгоритмом ССЗ.

Сравнение систем проводится в стационарных условиях низкой и высокой динамики, а также в нестационарных условиях. Под **низкой динамикой** подразумевается динамика фазы, обусловленная только динамикой ОГ. Под **высокой динамикой** подразумевается динамика, обусловленная динамикой ОГ и синусоидальным ускорением вдоль линии визирования амплитудой 10g и периодом 6,3 секунды, что дает амплитуду производной ускорения 10 g/c.

Сравниваются следующие характеристики систем:

- ♦ **Чувствительность** слежения за фазой при воздействии низкой динамики.
- ♦ **Чувствительность** слежения за фазой при воздействии высокой динамики.

Под чувствительностью слежения за фазой здесь будем понимать минимальное отношение сигнал/шум при котором вероятность срыва слежения за фазой в течении 100 секунд работы не более 0,5. Под срывом слежения за фазой будем понимать выход ошибки оценки фазы за пределы $\pm\pi$ рад.

Для определения чувствительности слежения за фазой набиралась статистика из 100 реализаций ошибок оценок фазы. Для каждой реализации отношение с/ш первые 5 секунд задается $c/\pi_{\max}$, далее резко снижается до $c/\pi_{\min}$ и остается на этом уровне 100 секунд. В конце реализации принимается решение о том, происходили ли срывы слежения за фазой или нет в течение последних 100 секунд. По 100 реализациям формируется вероятность срыва слежения за фазой.

В табл. 1 (колонка «Низкая динамика») представлены результаты, полученные в условиях низкой динамики при $c/\pi_{\max} = 15$ дБГц и $c/\pi_{\min} = 9,10,11$ дБГц.

Из представленных результатов можно сделать вывод о том, что **чувствительность** слежения за фазой в условиях динамики опорного генератора составила около **9 дБГц** для СМССФ и около **10 дБГц** для СМССФ с комплексным алгоритмом ССЗ. Влияние ССЗ отразилось на чувствительности, она уменьшилась на 1 дБ.

В табл. 1 (колонка «Высокая динамика») представлены результаты, полученные в условиях высокой динамики при $c/\pi_{\max} = 25$ дБГц и $c/\pi_{\min} = 23,24,25$ дБГц.

Из представленных результатов можно сделать вывод о том, что **чувствительность** слежения за фазой в условиях высокой динамики составила около **24 дБГц** для СМССФ и для СМССФ с комплексным алгоритмом ССЗ. Влияние ССЗ не отразилось на чувствительности, она осталась на прежнем уровне, по сравнению.

Таблица 1

Вероятность срыва фазы в СМССФ и СМССФ с комплексным алгоритмом ССЗ

Вероятность срыва фазы					
Низкая динамика			Высокая динамика		
$c/\pi_{\min}$, дБГц	СМССФ с ССЗ	СМССФ	$c/\pi_{\min}$, дБГц	СМССФ с ССЗ	СМССФ
11	0.19	0.14	25	0.11	0.10
10	0.40	0.31	24	0.41	0.41
9	0.70	0.47	23	0.90	0.89

Работа СМССФ с комплексным алгоритмом ССЗ в нестационарных условиях. СМССФ разработана для обеспечения оптимальных характеристик слежения за фазой в нестационарных условиях как по отношению сигнал/шум, так и по динамике процесса фазы. В сценарии моделирования будем менять СКО ускорения фазы и отношение сигнал/шум скачкообразным образом. Известно, что в таких условиях алгоритмы слежения за фазой, оптимальные для априорно известной динамики и отношения сигнал/шум, не только не позволяют достичь потенциальных характеристик чувствительности и точности, но и не способны сохранить слежение за фазой.

Определяется возможность слежения за фазой в СМССФ с комплексным алгоритмом ССЗ в нестационарных условиях. Разработан сценарий моделирования со скачкообразным изменением отношения с/ш и динамики, что на практике, например, может соответствовать разгонам/торможениям автомобиля с приемной антенной (при движении в городе) и проездам под мостами и между высотными зданиями.

Таблица 2

Сценарий изменения отношения с/ш и СКО ускорения фазы

Время, сек	Отношение с/ш, дБГц	Динамика
0-2	50	Низкая динамика Только динамика ОГ.
2-12	10	
12-14	50	
14-15	24	
15-25	24	Высокая динамика синусоидальное ускорение 10g и синусоидальный рывок 10 g/s.
25-26	50	
26-34	24	
34-37	24	Низкая динамика Только динамика ОГ.
37-41	10	

Результаты работы СМССФ с комплексным алгоритмом ССЗ представлены на рис. 2.

Видно, что в СМССФ удалось сохранить слежение за фазой в условиях скачкообразно изменяющегося СКО ускорения фазы и отношения с/ш

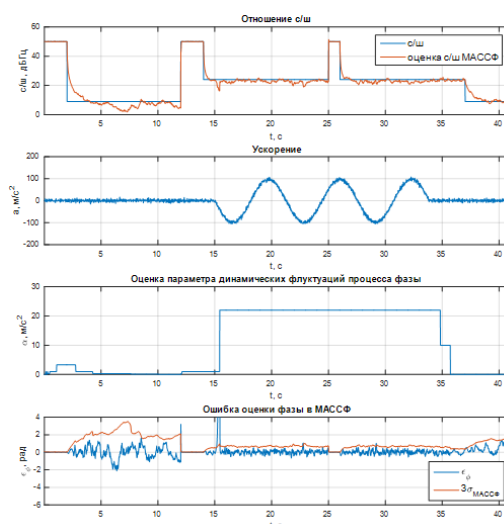


Рис. 2. Результаты работы СМССФ с комплексным алгоритмом ССЗ в нестационарных условиях

Закключение. Показано, что СМССФ с комплексным алгоритмом ССЗ способна обрабатывать скачок отношения сигнал/шум с 50 до 10 дБГц и обратно без потери слежения за фазой (в условиях низкой динамики). СМССФ с комплексным алгоритмом ССЗ способна сохранять слежение за фазой при скачкообразных переходах динамики между низкой (обусловленной только динамикой опорного генератора) и высокой (синусоидальное ускорение амплитудой 10g и синусоидальный рывок амплитудой 10 g/s) при отношении сигнал/шум 24 дБГц.

В условиях низкой динамики чувствительность слежения за фазой в СМССФ составила около **9 дБГц**. Влияние ССЗ отразилось на чувствительности СМССФ с комплексным алгоритмом ССЗ, уменьшилась на 1 дБ и составила **10 дБГц**. В условиях высокой динамики чувствительность слежения за фазой составила около **24 дБГц** как для СМССФ так и для СМССФ с комплексным алгоритмом ССЗ.

Таким образом, в реальных условиях, когда динамика объекта и отношения с/ш принимаемых сигналов меняются непредсказуемым образом, СМССФ сохраняет слежение за фазой в гораздо более широком диапазоне условий, чем неадаптивная система слежения за фазой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шаврин В.В., Тисленко В.И., Лебедев В.Ю., Конаков А.С., Филимонов В.А., Кравец А.П. Квази-оптимальная оценка параметров сигналов ГНСС в режиме когерентного приёма с использованием алгоритма сигма-точечного фильтра Калмана // *Гироскопия и навигация*. – 2016. – № 3 (94). – С. 26-37.
2. Шаврин В.В., Тисленко В.И., Лебедев В.Ю., Филимонов В.А., Конаков А.С. Сигма-точечный алгоритм фильтра Калмана в задаче оценки параметров сигналов ГНСС в некогерентном режиме слежения в аппаратуре автономной навигации космических аппаратов // *Гироскопия и навигация*. – 2018. – Т. 26, № 3. – С. 23-39.
3. Jong-Hoon Won and Bernd Eissfeller. A Tuning Method Based on Signal-to-Noise Power Ratio for Adaptive PLL and its Relationship with Equivalent Noise Bandwidth // *IEEE Communications Letters*. – February 2013. – Vol. 17, No. 2. – P. 393-396.
4. Jong-Hoon Won. A Novel Adaptive Digital Phase-Lock-Loop с комплексным алгоритмом CCЗ в нестационарных с комплексным алгоритмом CCЗ в нестационарных p for Modern Digital GNSS Receivers // *IEEE Communications Letters*. – January 2014. – Vol. 18, No. 1. – P. 46-49.
5. Dah-Jing Jwo and Sheng-Hung Wang. Adaptive Fuzzy Strong Tracking Extended Kalman Filtering for GPS Navigation // *IEEE Sensors Journal*. – May 2007. – Vol. 7, No. 5. – P. 778-789.
6. Jordi Vilà-Valls, Pau Closas, Carles Fernández-Prades, Jose A. López-Salcedo, and Gonzalo Seco-Granados. Adaptive GNSS Carrier Tracking Under Ionospheric Scintillation: Estimation vs. Mitigation // *IEEE Communications letters*. – June 2015. – Vol. 19, No. 6. – P. 961-964.
7. Emanuela Falletti, Marco Pini, Letizia Lo Presti. Low Complexity Carrier-to-Noise Ratio Estimators for GNSS Digital Receivers // *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*. – January 2011. – Vol. 47, No. 1. – P. 420-437.
8. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем: учеб. пособие. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2022. – 840 с.
9. Demetrios G. Lainiotis. Partitioning: A Unifying framework for adaptive systems, I: Estimation // *IEEE*. – August 1976. – Vol. 64, No. 8. – P. 1126-1143.
10. Перов А.И. Адаптивная фильтрация сообщений с неизвестными статистическими характеристиками // *Известия вузов СССР. Серия: Радиоэлектроника*. – 1980. – Т. 23, № 4. – С. 40-45.
11. Перов А.И. Адаптация линейных систем фильтрации // *Радиотехника и электроника*. – 1987. – Т. 33, № 8. – С. 40-45.
12. Первачев С.В., Перов А.И. Адаптивная фильтрация сообщений. – М.: Радио и связь, 1991. – 160 с.
13. Magill D.T. Optimal adaptive estimation of sampled stochastic processes // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 1965. – AC-10. – P. 434-439.
14. Rong Li and V. Jilkov. Survey of maneuvering target tracking. Part V. multiple-model methods // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. – 2005. – Vol. 41, No. 4. – P. 1255-1321.
15. Sebastian Dinger. State estimation with the Interacting Multiple Model (IMM) method. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.04875> – июль 2022 г.
16. Перов А.И., Замолодчиков В.Н., Чиликин В.М. Радиоавтоматика: учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2014. – 320 с.
17. Understanding GPS: Principles and Applications / ed. by E.D. Kaplan. – Artech House, Inc., Norwood, Massachusetts, 1996. – P. 86-92.
18. Шатилов А.Ю. Использование критерия срыва слежения при оценке помехоустойчивости следящих систем // *Радиотехника*. – 2010. – № 11. – С. 25-33.
19. Шатилов А.Ю. Исследование кратковременных нестабильностей кварцевых опорных генераторов для применения в НАП // *Радионавигационные технологии*. – 2013. – № 3. – С. 86-92.
20. Бакитько Р.В., Дворкин В.В., Карутин С.Н., Корогодин И.В., Нагин И.А., Перов А.И., Поваляев А.А., Фаткулин Р.Ф., Шатилов А.Ю. ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития: монография / под ред. А.И. Перова. – М.: Радиотехника, 2020. – 1072 с.

REFERENCES

1. Shavrin V.V., Tislenko V.I., Lebedev V.Yu., Konakov A.S., Filimonov V.A., Kravets A.P. Kvazi-optimal'naya otsenka parametrov signalov GNSS v rezhime kogerentnogo priema s ispol'zovaniem algoritma sigma-tochechnogo fil'tra Kalmana [Quasi-optimal estimation of GNSS signal parameters in coherent reception mode using the Kalman sigma-point filter algorithm], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and Navigation], 2016, No. 3 (94), pp. 26-37.
2. Shavrin V.V., Tislenko V.I., Lebedev V.Yu., Filimonov V.A., Konakov A.S. Sigma-tochechnyy algoritm fil'tra Kalmana v zadache otsenki parametrov signalov GNSS v nekogerentnom rezhime slezheniya v apparature avtonomnoy navigatsii kosmicheskikh apparatov [Sigma-point Kalman filter algorithm in the problem of estimating GNSS signal parameters in incoherent tracking mode in autonomous navigation equipment of spacecraft], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and Navigation], 2018, Vol. 26, No. 3, pp. 23-39.

3. Jong-Hoon Won and Bernd Eissfeller. A Tuning Method Based on Signal-to-Noise Power Ratio for Adaptive PLL and its Relationship with Equivalent Noise Bandwidth, *IEEE Communications Letters*, February 2013, Vol. 17, No. 2, pp. 393-396.
4. Jong-Hoon Won. Novel Adaptive Digital Phase-Lock-Loop s kompleksnym algoritmom SSZ v nestatsionarnykh s kompleksnym algoritmom SSZ v nestatsionarnykh p for Modern Digital GNSS Receivers [Novel Adaptive Digital Phase-Lock-Loop with Complex Algorithm for Non-Stationary Phase-Lock-Loop with Complex Algorithm for Non-Stationary Phase-Lock-Loop p for Modern Digital GNSS Receivers], *IEEE Communications Letters*, January 2014, Vol. 18, No. 1, pp. 46-49.
5. Dah-Jing Jwo and Sheng-Hung Wang. Adaptive Fuzzy Strong Tracking Extended Kalman Filtering for GPS Navigation, *IEEE Sensors Journal*, May 2007, Vol. 7, No. 5, pp. 778-789.
6. Jordi Vilà-Valls, Pau Closas, Carles Fernández-Prades, Jose A. López-Salcedo, and Gonzalo Seco-Granados. Adaptive GNSS Carrier Tracking Under Ionospheric Scintillation: Estimation vs. Mitigation, *IEEE Communications letters*, June 2015, Vol. 19, No. 6, pp. 961-964.
7. Emanuela Falletti, Marco Pini, Letizia Lo Presti. Low Complexity Carrier-to-Noise Ratio Estimators for GNSS Digital Receivers, *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, January 2011, Vol. 47, No. 1, pp. 420-437.
8. Perov A.I. Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem: ucheb. posobie [Statistical theory of radio engineering systems: a tutorial]. 2nd ed. Moscow: Radiotekhnika, 2022, 840 p.
9. Demetrios G. Lainiotis. Partitioning: A Unifying framework for adaptive systems, I: Estimation, *IEEE*, August 1976, Vol. 64, No. 8, pp. 1126-1143.
10. Perov A.I. Adaptivnaya fil'tratsiya soobshcheniya s neizvestnymi statisticheskimi kharakteristikami [Adaptive filtering of messages with unknown statistical characteristics], *Izvestiya vuzov SSSR. Seriya: Radioelektronika* [News of USSR Universities. Series: Radio Electronics], 1980, Vol. 23, No. 4, pp. 40-45.
11. Perov A.I. Adaptatsiya lineynykh sistem fil'tratsii [Adaptation of linear filtering systems], *Radiotekhnika i elektronika* [Radio Engineering and Electronics], 1987, Vol. 33, No. 8, pp. 40-45.
12. Pervachev S.V., Perov A.I. Adaptivnaya fil'tratsiya soobshcheniy [Adaptive filtering of messages]. Moscow: Radio i svyaz', 1991, 160 p.
13. Magill D.T. Optimal adaptive estimation of sampled stochastic processes, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1965, AC-10, pp. 434-439.
14. Rong Li and V. Jilkov. Survey of maneuvering target tracking. Part V. multiple-model methods, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, Vol. 41, No. 4, pp. 1255-1321.
15. Sebastian Dinger. State estimation with the Interacting Multiple Model (IMM) method. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.04875> – July 2022.
16. Perov A.I., Zamolodchikov V.N., Chilikin V.M. Radioavtomatika: uchebnik dlya vuzov [Radioautomation: a textbook for universities]. Moscow: Radiotekhnika, 2014, 320 p.
17. Understanding GPS: Principles and Applications, ed. by E.D. Kaplan. Artech House, Inc., Norwood, Massachusetts, 1996, pp. 86-92.
18. Shatilov A.Yu. Ispol'zovanie kriteriya sryva slezheniya pri otsenke pomekhoustoychivosti sledyashchikh sistem [Using the tracking failure criterion to assess the noise immunity of tracking systems], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2010, No. 11, pp. 25-33.
19. Shatilov A.Yu. Issledovanie kratkovremennykh nestabil'nostey kvartsevykh opornykh generatorov dlya primeneniya v NAP [Study of short-term instabilities of quartz reference oscillators for use in NAP], *Radionavigatsionnye tekhnologii* [Radio navigation technologies], 2013, No. 3, pp. 86-92.
20. Bakit'ko R.V., Dvorkin V.V., Karutin S.N., Korogodin I.V., Nagin I.A., Perov A.I., Povalyayev A.A., Fatkulin R.F., Shatilov A.Yu. GLONASS. Modernizatsiya i perspektivy razvitiya: monografiya [GLONASS. Modernization and development prospects: monograph], red. by A.I. Perova. Moscow: Radiotekhnika, 2020, 1072 p.

Черкасова Анастасия Алексеевна – Акционерное общество «Конструкторское бюро навигационных систем»; e-mail: PotrikeevaAA@mpei.ru; г. Москва, Россия; тел.: 84956656148; инженер-программист 1 кат.; аспирант («Научно-исследовательский институт «Московский энергетический университет»).

Шатилов Александр Юрьевич – Акционерное общество «Конструкторское бюро навигационных систем»; e-mail: shatilov@navis.ru; г. Москва, Россия; тел.: 84956656148; начальник отделения базовых технологий ИНС; к.т.н.

Cherkasova Anastasia Alekseevna – Joint Stock Company “KB NAVIS”; e-mail: PotrikeevaAA@mpei.ru; Moscow, Russia; phone: +74956656148; Software engineer 1st cat., graduate student («National Research Institute «Moscow Power Engendering Institute»).

Shatilov Alexander Yurievich – Joint Stock Company “KB NAVIS”; e-mail: shatilov@navis.ru; Moscow, Russia; phone: +74956656148; head of the Department of Basic Technologies of INS; cand. of eng. sc.

Раздел IV. Техническое зрение

УДК 551.46.0

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-241-256

Ю.К.Грузевич, Ю.Н. Гордиенко, П.С. Альков, Д.В. Волков, М.С. Ходаковская**БОРТОВАЯ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНАЯ СИСТЕМА ПОДВОДНОГО ВИДЕНИЯ
ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА «ВОЗДУХ-ВОДА»**

Целью данной работы является создание системы обнаружения подводных объектов, предназначенная для установки на надводные платформы (летательные аппараты или дистанционно пилотируемые летательные аппараты). Системы такого типа могут применяться для решения широкого спектра задач в различных областях народного хозяйства: поиск редких рыб и морских млекопитающих, определение путей их миграции, диагностика и прокладка подводных трубопроводов и сетей волоконных кабелей, контроль загрязнения толщи морских вод, поиск затонувших кораблей и археологических ценностей, проведение спасательных работ. Для решения данной задачи был описан процесс распространения лазерного излучения до объекта через границу раздела «воздух-вода», смоделирована взволнованная морская поверхность, предложен ряд математических допущений и приближений. В практической части была разработана структурная схема лазерной оптико-телевизионной активно-импульсной системы подводного видения, включающая в себя приемный и передающий каналы, а также устройство управления, состоящее из блока обработки изображений и контроллера управления. В состав приемного канала вошел электронно-оптический преобразователь III+ поколения, высокочувствительный в спектральном диапазоне прозрачности морской воды. Основным элементом передающего канала является высокоэффективный импульсный лазер, излучающий в спектральном диапазоне прозрачности морской воды. Собранный прибор прошел полевые испытания, в результате которых стало понятно, что обнаружение и распознавание подводных целей с борта летательного аппарата через границу раздела «воздух-вода» по сформированному изображению возможно, предельная дальность обнаружения и распознавание подводных целей активно-импульсной системы подводного видения с борта летательного аппарата через границу раздела «воздух-вода» в основном определяется затуханием оптического излучения в морской воде и мощностью подсвечивающего лазерного импульсного излучения. При этом, отличительной особенностью работы активно-импульсной системы подводного видения является то, что увеличение дальности обнаружения и распознавания практически прямо пропорционально до определенного уровня мощности лазерного излучения, а дальнейшее увеличение мощности приводит к незначительному увеличению дальности.

Активно-импульсная система подводного видения; электронно-оптический преобразователь; модель; импульсный лазер.

Yu.K., Gruzevich, Yu.N. Gordienko, P.S. Alkov, D.V. Volkov, M.S. Khodakovskaya**ONBOARD ACTIVE-PULSE UNDERWATER VISION SYSTEM THROUGH
THE AIR-WATER BOUNDARY**

The objective of this work is to create a system for detecting underwater objects intended for installation on surface platforms (aircraft or remotely piloted aircraft). Systems of this type can be used to solve a wide range of problems in various areas of the national economy: searching for rare fish and marine mammals, determining their migration routes, diagnostics and laying underwater pipelines and fiber optic cable networks, monitoring seawater pollution, searching for sunken ships and archaeological treasures, and carrying out rescue operations. To solve this problem, the process of laser radiation propagation to an object across the air-water interface was described, a rough sea surface was modeled, and a number of mathematical assumptions and approximations were proposed. In the practical part, a structural diagram of a laser optical-television active-pulse underwater vision system was developed, including receiving and transmitting channels, as well as a control device consisting of an image processing unit and a control

controller. The receiving channel includes an electron-optical converter of the III+ generation, highly sensitive in the spectral range of sea water transparency. The main element of the transmitting channel is a highly efficient pulse laser emitting in the spectral range of sea water transparency. The assembled device has undergone field tests, as a result of which it became clear that detection and recognition of underwater targets from an aircraft through the air-water interface using the generated image is possible, the maximum detection range and recognition of underwater targets of the active-pulse underwater vision system from an aircraft through the air-water interface is mainly determined by: attenuation of optical radiation in sea water and the power of the illuminating laser pulse radiation. At the same time, a distinctive feature of the active-pulse underwater vision system is that the increase in the detection and recognition range is almost directly proportional to a certain level of laser radiation power, and a further increase in power leads to an insignificant increase in range.

Active-pulse underwater vision system; image intensifier tube; model; pulse laser.

Введение. В последнее время все большее значение приобретает получение информации о подводных объектах не только с целью определения их положения и местонахождения, но и для их распознавания и идентификации за счет формирования изображения этих объектов. Одним из перспективных направлений получения изображения подводных объектов является применение лазерных оптико-телевизионных активно-импульсных систем подводного видения (АИС ПВ) для наблюдения за косяками рыб, поиска затонувших объектов, измерения профиля морского дна и других применений. АИС ПВ могут располагаться на борту летательных аппаратов (ЛА), например, вертолете или дистанционно пилотируемом летательном аппарате (ДПЛА) [1–8]. При этом, время поиска подводных объектов с высоты пилотирования ЛА значительно сокращается за счет увеличения площади охватываемого района поиска. В связи с этим, возникает задача оценки дальности обнаружения и распознавания подводных объектов, а также оценки качества их изображения, регистрируемого АИС ПВ через взволнованную границу раздела «воздух-вода».

Принцип действия подводного видения. Подводное видение основано на возможности наблюдения в узком спектральном диапазоне прозрачности морской воды от 450 нм до 550 нм (рис. 1 [9]) при освещении наблюдаемого пространства короткими импульсами оптического излучения с длительностью меньшей, чем время распространения импульсов до объектов наблюдения, и синхронизированном приеме и многократном усилении отраженных от подводных объектов наблюдения оптических сигналов. Такой метод наблюдения получил название активно-импульсный. Он обеспечивает формирование изображений в ограниченном по глубине окружающего подводного пространства и резко уменьшает зависимость наблюдения от условий освещенности объектов наблюдения и от окружающих их фонов, а также естественных оптических помех – это сама рассеивающая морская вода и др. Применение активно-импульсного метода формирования подводных видеоизображений позволяет устранить «паразитное» влияние помехи обратного рассеяния оптического излучения, которые накладываются на полезное изображение наблюдаемых подводных объектов, снижая их контраст.

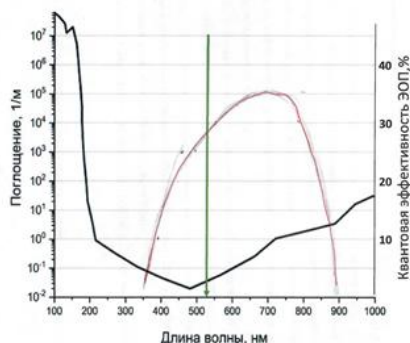


Рис. 1. Спектральная характеристика пропускания морской воды, чувствительности ЭОП III поколения с «голубым» фотокатодом и излучения Nd:YAG лазера

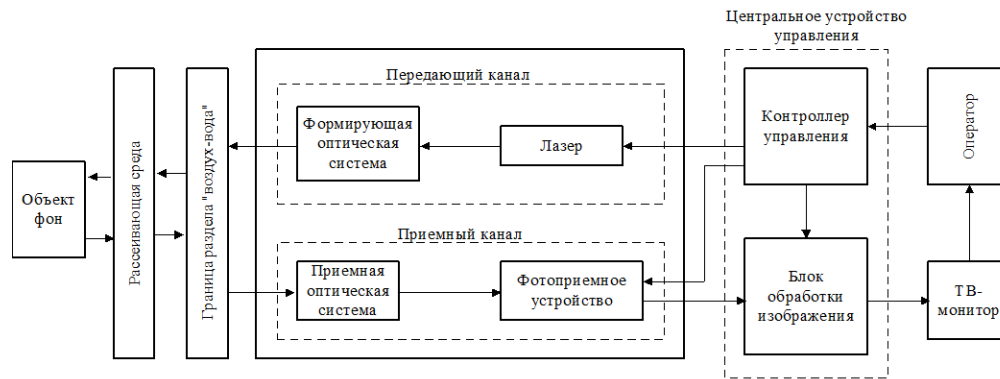


Рис. 2. Структурная схема лазерной оптико-телевизионной активно-импульсной системы подводного видения

На рис. 2 представлена обобщенная структурная схема лазерной оптико-телевизионной активно-импульсной системы подводного видения (АИС ПВ). Передающий канал формирует зондирующее импульсное лазерное излучение. Основными его элементами являются лазер подсвета, излучающий в спектральном диапазоне прозрачности морской воды, и формирующая оптическая система для изменения угловой расходимости лазерного излучения. Зондирующее излучение проходит через границу раздела «воздух-вода», рассеивающую среду и подсвечивает подводный объект. Отраженное лазерное излучение после обратного прохождения через морскую воду и границу раздела «вода - воздух» регистрируется приемным каналом, содержащим приемную оптическую систему и фотоприемное устройство на основе чувствительной структуры «Электронно-оптический преобразователь (ЭОП) III поколения с фотокатодом, чувствительным в спектральном диапазоне прозрачности морской воды, – цифровая ТВ камера». Центральное устройство управления содержит блок обработки изображения и контроллер управления. Блок обработки изображения предназначен для усиления и обработки сигнала с фотоприемного устройства и формирования видеосигнала, поступающего на вход ТВ монитора. Контроллер управления осуществляет формирование синхронизирующих и управляющих импульсов, индикацию режимов работы АИС ПВ, выполнение команд оператора.

Важнейшим ключевым элементом, используемым для создания высокоэффективных АИС ПВ, является быстродействующий, специально разработанный специалистами ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», ЭОП III+ поколения с высокой квантовой эффективностью в спектральной области прозрачности морской воды, который получил название: ЭОП III+ поколения с «голубым» фотокатодом. Спектральная характеристика фоточувствительности ЭОП III+ поколения с «голубым» фотокатодом приведена на рис. 1 [9].

Активно-импульсный метод формирования подводных изображений тесно связан с развитием средств лазерной импульсной подсветки, и, прежде всего, с созданием высокоэффективных импульсных лазеров, излучающих в спектральном диапазоне прозрачности морской воды. Разработка современных высокоэффективных импульсных лазеров, рабочим телом которого является кристалл Nd:YAG, накачка рабочего тела которого осуществляется диодными светоизлучающими линейками, а модуляция добротности производится электрооптическим затвором. Удвоение частоты генерации (на длине волны 532 нм) осуществляется элементом на основе кристалла КТР, что обеспечивает излучение в спектральном диапазоне прозрачности морской воды (рис. 1 [9]). Разработанные Nd:YAG лазеры обеспечивают при энергии в импульсе от несколько сотен мДж до десятков мДж длительность импульса (по уровню 0,5) от единиц до десятков наносекунд.

Наблюдение подводных объектов через взволнованную границу раздела «воздух-вода». Для обеспечения обнаружения и распознавания подводных объектов через взволнованную границу раздела «воздух-вода» на фоне рассеивающей морской воды или морского дна в условиях сильно рассеивающей водной среды и при отсутствии подсе-

чивающего солнечного излучения АИС ПВ может устанавливаться на борту летательного аппарата (ЛА), например, вертолета или ДПЛА. Рассмотрим принцип действия двух вариантов наблюдения подводных объектов с борта ЛА в АИС ПВ:

- ♦ с непрерывно визирующим пространство объектов (рис. 3);
- ♦ с параллельным сканированием подсвечивающим лазерным излучением и восстановлением изображения (рис. 4).

В обоих вариантах АИС ПВ для подсветки используются импульсный лазерный источник «И», который освещает подводный объект на окружающем фоне, а отраженное объектом лазерное излучение регистрируется приемным каналом АИС ПВ («ПР») на основе ФПМ чувствительной структурой «ЭОП III⁺» поколения – цифровая КМОП - матрица.

В обоих вариантах АИС ПВ находится на борту ЛА на высоте $H_{\text{ЛА}}$ над поверхностью моря, а диаграммы направленности импульсного лазерного источника и приемного канала на базе ФПМ ориентированы по нормали к морской поверхности.

В варианте исполнения АИС ПВ, приведенном на рис. 3, диаграммы направленности источника излучения в пределах телесного угла $\Omega_{\text{и}} = \pi \cdot \alpha_{\text{и}}$ (где $\alpha_{\text{и}}$ – угол при вершине конического сечения телесного угла $\Omega_{\text{и}}$) и приемного канала в пределах телесного угла $\Omega_{\text{пр}} = \pi \cdot \alpha_{\text{пр}}$ (где $\alpha_{\text{пр}}$ – угол при вершине конического сечения телесного угла $\Omega_{\text{пр}}$) практически совпадают ($\Omega_{\text{и}} \approx \Omega_{\text{пр}}$).

В варианте исполнения АИС ПВ, приведенном на рис. 4, лазерная подсветка пространства объектов наблюдения происходит путем сканирования лазерным излучением в пределах угла $\alpha_{\text{и}} \approx \alpha_{\text{пр}}$ с диаграммой направленности источника излучения в пределах телесного угла $\delta\Omega_{\text{и}}$ ($\delta\Omega_{\text{и}} \ll \Omega_{\text{пр}}$) в направлении по нормали к вектору скорости ЛА. При таком исполнении у АИС ПВ будет более высокая эффективность подсветки пространства наблюдения и, следовательно, система будет обладать большей дальностью видения подводных объектов $Z_{\text{об}}$.

При наблюдении подводных объектов через взволнованную границу раздела «воздух-вода» с помощью АИС ПВ, установленной на борту ЛА, процессы рассеяния и селективного поглощения оптического излучения в морской воде заметно влияют на качество изображения даже при сравнительно небольших расстояниях между подводными объектами и системой наблюдения [10–13].

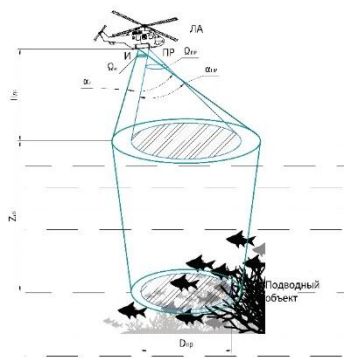


Рис. 3. Наблюдение подводных объектов с борта ЛА в АИС ПВ непрерывно визирующих пространство объектов

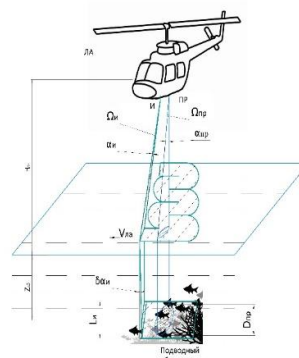


Рис. 4. Наблюдение подводных объектов с борта ЛА в АИС ПВ с параллельным сканированием подсвечивающим лазерным излучением и восстановлением изображения

Это влияние проявляется в ослаблении яркости и снижении контрастности изображения, искажении его пространственной структуры, утрате информации о цвете объекта, относительном увеличении шумовой составляющей изображения и, в конечном итоге, ограничении дальности видимости в основном, в результате воздействия двух основных факторов:

- ♦ многократного рассеяния оптического излучения в морской воде, которое приводит к размытию изображения подводных объектов;
- ♦ флуктуации в распределении подводной освещенности, вызванные случайным характером преломления излучения на взволнованной поверхности.

Понижение качества изображения можно объяснить тем, что перестают разрешаться высокие пространственные частоты, и, чем выше скорость ветра, тем ниже максимальная разрешаемая пространственная частота. В прозрачной воде и в отсутствие волнения максимальная разрешаемая пространственная частота ограничивается только разрешающей способностью АИС ПВ. При наличии ветра качество изображения ухудшается, возникают искажения топологии изображения, т.е. уменьшается максимальная разрешаемая частота.

Повысить качество изображения можно путем его статистического усреднения по ансамблю реализаций за время наблюдения, при этом происходит восстановление его топологии и повышается максимальная разрешаемая частота. При бесконечно большом времени усреднения максимальная разрешаемая частота стремится к граничной частоте и изображение становится подобным объекту. В этом случае для определения предельной дальности видения можно использовать подход, основанный на использовании понятия минимального разрешаемого контраста (МРК) [14, 15].

В теоретическом плане задача расчета статистических характеристик сигнала, проходящего через взволнованную морскую поверхность, достаточно сложна, так как требует одновременного учета двух конкурирующих механизмов: случайного характера преломления световых лучей на взволнованной поверхности, приводящего к появлению флуктуаций оптического сигнала, и многократного рассеяния подсвечивающего лазерного излучения в морской воде, подавляющего флуктуации в морской среде.

В связи с этим принимается ряд приближений и положений, упрощающих задачу:

- ♦ флуктуации мощности сигнала определяются только уклонами волн и не зависят от их высот (приближение случайного фазового экрана);
- ♦ эффекты многократного рассеяния света в морской воде оказывают на процесс формирования подводного светового поля более сильное влияние, чем механизм случайного разброса световых лучей при пересечении взволнованной морской поверхности (линейное по уклонам приближение);
- ♦ время распространения одного зондирующего импульса от границы раздела до наблюдаемого объекта и обратно, а также инерционность приемной системы намного меньше характерного времени изменения формы поверхности, поэтому ее можно считать «замороженной» в течение времени одного наблюдения.

В настоящее время значительное число теоретических работ посвящено исследованию влияния поверхностного волнения и толщи воды на качество изображения подводного объекта, наблюдаемого из атмосферы. При этом были получены аналитические соотношения между статистически средними характеристиками изображения и условиями наблюдения. При таком подходе можно оценить искажения, которые вносят в статистически среднее изображение процессы многократного рассеяния и поглощения излучения в водной среде и случайного преломления на взволнованной границе [16–18].

Однако при современном развитии элементной базы для АИС ПВ (быстродействующих высокоэффективных фотоприемных устройств и импульсных лазеров), используемой на практике при формировании изображений подводных объектов в натурных условиях, невозможно, а в ряде случаев и не целесообразно добиваться полного усреднения изображения, т.к. длительность регистрации изображения подводного объекта с применением АИС ПВ, как правило, крайне мала и составляет от единиц до десятков наносекунд. Вследствие этого обычно приходится идти по пути упрощения или идеализации модели волнения на поверхности раздела, считая границу раздела «воздух-вода» гладкой и характеристики сигнала, регистрируемого быстродействующей АИС ПВ, считать детерминированными величинами, которые можно считать средними значениями флуктуаций при наблюдении в реальных условиях через взволнованную границу, усредняя по ансамблю реализаций величины получаемого сигнала [19].

Для оценки потенциальных возможностей АИС ПВ, работающей с борта ЛА в рассеивающей морской воде для обнаружения подводных объектов, использовалось допущение, при котором формирование изображения осуществляется через гладкую границу раздела «воздух-вода». Предложенное допущение позволяет оценить только предельную дальность обнаружения подводных объектов в условиях недостаточной естественной освещенности или ночью в условиях естественных и организованных оптических помех и не может быть применима при решении задач высокоточного их распознавания и идентификации.

При создании бортовых АИС ПВ принципиально важной проблемой является обеспечение воспроизводимого изображения, которое определяется субъективным впечатлением. Это воспринимаемая метрика, зависящая не только от оптимального функционирования системы «глаз – мозг», но и от входных параметров других сенсорных систем, эмоций, обученности и др. Воспринимаемое качество одного и того же изображения существенно разнится между наблюдателями, а также отличается по времени для одного наблюдателя. Поэтому качество изображения, сформированной АИС ПВ, установленной на борту ЛА, не может оцениваться в абсолютных величинах, а визуальные психофизиологические исследования не позволяют количественно измерить все показатели изображающих систем. Существует множество алгоритмов для оценки качества изображения, каждая из которых получена для конкретных условий наблюдения эмпирическим путем. Все они в той или иной мере используют две основные характеристики – пространственную и энергетическую разрешающую способность.

Для оценки возможности обнаружения с вероятностью ($P_{обн}=0.9$) и распознавания с вероятностью ($P_{расп}=0.8$) подводных объектов с критическим размером 2.5 м и 12.5 м в морской воде с прозрачностью по белому диску $Z_6 = 10$ м и $Z_6 = 20$ м с применением АИС ПВ с борта ЛА с высоты 50 м через границу раздела «воздух-вода» в качестве примера были рассмотрены следующие параметры макетного образца АИС ПВ:

- ♦ канал подсветки на основе импульсных лазеров, излучающих на длине волны 527 нм, НФЛ-Н100-2И с энергией в импульсе 50 мДж и НФЛ-Н40СТ с энергией в импульсе 200 мДж;
- ♦ приемный канал на основе ФПМ типа «ФПМ-5-1» с чувствительной структурой «ЭОП III⁺ поколения типа «ЭПМ 62Г» – цифровая КМОП-матрица типа «IMX 174», разработанный ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ».

Алгоритм расчета дальности обнаружения и распознавания подводного объекта по его изображению, сформированному АИС ПВ, установленный на борту ЛА, через границу раздела «воздух-вода», приведен в [3]. В соответствии с данным алгоритмом на первом этапе расчета, в соответствии со структурной схемой АИС ПВ, приведенной на рис. 2, определяется ее модуль передаточной функции (МПФ). При этом АИС ПВ представляется в виде составной (многоступенной) линейной изображающей системы, что позволит определить МПФ всей системы (системную МПФ) в виде произведения МПФ отдельных ее подсистем:

$$\bar{H}_{АИС}(\nu) = \bar{H}_{ос}(\nu) \bar{H}_{ЭОП}(\nu) \bar{H}_{ро}(\nu) \bar{H}_{КМОП}(\nu) \bar{H}_{эл}(\nu) \bar{H}_{мон}(\nu) \bar{H}_{зл}(\nu), \quad (1)$$

где $\bar{H}_{ос}(\nu)$ – ОПФ приемной оптической системы; $\bar{H}_{ЭОП}(\nu)$ – МПФ ЭОП III+ поколения; $\bar{H}_{ро}(\nu)$ – ОПФ репродукционного объектива; $\bar{H}_{КМОП}(\nu)$ – МПФ матричного приемника оптического излучения (КМОП – матрицы); $\bar{H}_{эл}(\nu)$ – МПФ электронного тракта; $\bar{H}_{мон}(\nu)$ – МПФ монитора (дисплея); $\bar{H}_{зл}(\nu)$ – зрительного анализатора.

Системная МПФ активно-импульсной системы регистрации и отображения видеоизображений характеризует качество изображения, воспроизводимого на экране монитора, и оператор оценивает качество этого изображения.

Результирующая МПФ образца АИС ПВ, полученная перемножением МПФ всех составляющих звеньев системы по формуле (1). На рис. 5 приведен график результирующей МПФ образца АИС ПВ.

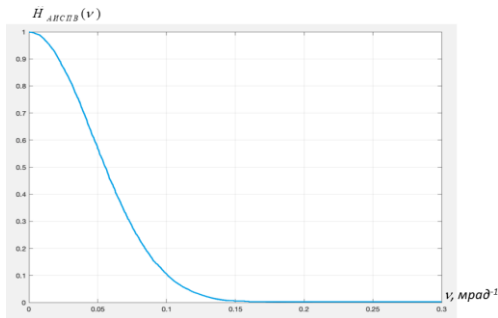


Рис. 5. Результирующая МПФ образца АИС ПВ

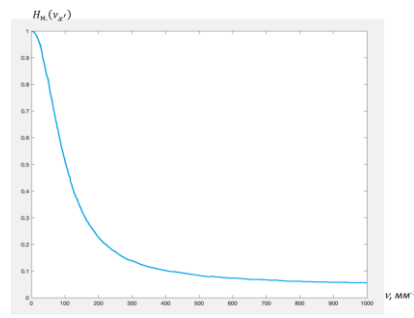


Рис. 6. Результирующая МПФ слоя рассеивающей морской воды

На следующем этапе расчета определяются гидрооптические характеристики и МПФ морской воды. В соответствии с заданным значением прозрачности морской воды по белому диску Z_6 находим вероятность выживания фотона A , показатель ослабления ε , показатель рассеяния σ и показатель поглощения k_n , а затем по полученным значениям (A , ε , σ и k_n) находим коэффициент асимметрии k_{ac} индикатрисы рассеяния $x(\gamma)$ и рассчитаем интегральный параметр индикатрисы рассеяния μ , значение индикатрисы рассеяния в направлении обратного рассеяния x_π и величину φ_0 . [3]. Значения гидрооптических характеристик морской среды для значения $Z_6 = 20$ м и $Z_6 = 10$ м приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения гидрооптических характеристик морской среды

$Z_6, \text{м}$	A	$\varepsilon, \text{м}^{-1}$	$\sigma, \text{м}^{-1}$	$k_n, \text{м}^{-1}$	φ_0	μ	x_π
20	0,80	0,29	0,23	0,06	0,0112	0,071	0,0713
10	0,85	0,63	0,53	0,10	0,0119	0,068	0,0683

МПФ слоя рассеивающей и турбулентной морской среды определяются по формулам, которые для угловых пространственных частот можно записать в виде:

$$H_{\text{м.р.}}(v') = \exp \left[-\Lambda \varepsilon z + \frac{\Lambda \varepsilon z}{\sqrt{(2\pi\mu v')^2 + 1}} \right] = \exp \left(-3.346 + \frac{3.346}{\sqrt{(0.0075v')^2 + 1}} \right)$$

$$H_{\text{м.т.}}(v') = \exp \left[-\frac{(\lambda v' k_n)^2 \langle \Delta n^2 \rangle z}{3a} \right].$$

Для расчетов принимаем следующие значения: $\langle \Delta n^2 \rangle = 10^{-9}$; $n = 1,34$; $a = 0,5$.

Результирующая МПФ слоя морской воды:

$$H_{\text{м}}(v') = H_{\text{м.р.}}(v') = H_{\text{м.т.}}(v').$$

Результирующая МПФ слоя рассеивающей морской воды $H_{\text{м}}(v')$ приведена на рис. 6.

Далее необходимо определить энергетические характеристики сигнальных и фоновых составляющих регистрируемого излучения, т.к. при работе АИС ПВ под водой необходимо осуществить стробирование по дальности из-за интенсивного обратного рассеяния излучения подсвета в морской воде, обеспечивая при этом длительность строба равной длительности зондирующего импульса, а другой особенностью энергетического расчета является наличие в фотоприемном устройстве ЭОП III+ поколения типа ЭПМ-62Г, осуществляющего многократное усиление яркости. Паспортные характеристики ЭОП III+ поколения типа ЭПМ-62Г приведены в табл. 2

Таблица 2

Паспортные характеристики ЭОП III+ поколения типа ЭПМ-62Г

Характеристика	Обозначение	Численное значение
Спектральная чувствительность фотокатода	$S_{\text{фк}}^{\text{р}}$	$30 \frac{\text{мА}}{\text{Вт}}$
Интегральная чувствительность фотокатода	$S_{\text{фк}}^{\text{п}}$	$1200 \frac{\text{мкА}}{\text{лм}}$
Электронно-оптическое увеличение	Γ	1
Световая отдача люминофора	γ	$30 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}$
Коэффициент усиления яркости	η	$3 \cdot 10^4$

Для определения энергетических характеристик необходимо определить число фотоэлектронов, генерируемых в одном пикселе регистрируемым излучением, от объекта, фона и помех обратного рассеяния по формулам, приведенным в табл. 3. В табл. 3 также приведены формулы для вычисления чисел фотоэлектронов, формируемых в результате солнечной засветки.

Графически зависимости $n(z)$, характеризующие работу подводной АИС ПВ в режиме стробирования по дальности, представлены на рис. 7–10.

Таблица 3

Выражения для расчета чисел фотоэлектронов

№	Число фотоэлектронов	Расчетная формула
1	$n_{\text{об.л}}$	$\frac{P_0 t_{\text{им}} S_{\text{фпу}} K_{\text{опт}} \rho_{\text{об}} \alpha_{\text{п}}^2 r_{\text{п}}^2 \exp[-2\epsilon z(1-\Lambda)] q_2}{4\mu^2 \Lambda \epsilon z^3 + (\alpha_{\text{н}}^2 + \alpha_{\text{п}}^2) z^2}$
2	$n_{\text{ф.л}}$	$\frac{P_0 t_{\text{им}} S_{\text{фпу}} K_{\text{опт}} \rho_{\text{ф}} \alpha_{\text{п}}^2 r_{\text{п}}^2 \exp[-2\epsilon z(1-\Lambda)] q_2}{4\mu^2 \Lambda \epsilon z^3 + (\alpha_{\text{н}}^2 + \alpha_{\text{п}}^2) z^2}$
3	$n_{\text{ПОР.л}}^{\text{ст}}$	$\left(\frac{\sigma x_{\text{п}} c t_{\text{им}}}{8n} \right) \frac{P_0 t_{\text{им}} S_{\text{фпу}} K_{\text{опт}} \alpha_{\text{п}}^2 r_{\text{п}}^2 \exp[-2\epsilon z(1-\Lambda)]}{4\mu^2 \Lambda \epsilon z^3 + (\alpha_{\text{н}}^2 + \alpha_{\text{п}}^2) z^2}$
4	$n_{\text{об.с}}^{\text{ст}}$	$\frac{E_{\text{мд}}}{\pi} t_{\text{им}} S_{\text{фпу}} \rho_{\text{об}} \pi \alpha_{\text{п}}^2 \pi r_{\text{п}}^2 \Delta \lambda_{\text{ф}} \exp(-k_{\text{п}} z) q_4$
5	$n_{\text{ф.с}}^{\text{ст}}$	$\frac{E_{\text{мд}}}{\pi} t_{\text{им}} S_{\text{фпу}} \rho_{\text{ф}} \pi \alpha_{\text{п}}^2 \pi r_{\text{п}}^2 \Delta \lambda_{\text{ф}} \exp(-k_{\text{п}} z)$
6	$n_{\text{ПОР.с}}^{\text{ст}}$	$\frac{E(z_1)}{\pi} t_{\text{им}} S_{\text{фпу}} \frac{\varphi_0 \Lambda}{4\gamma} \pi \alpha_{\text{п}}^2 \pi r_{\text{п}}^2 (1 - \exp(-2\gamma \epsilon z))$

Графически зависимости $n(z)$, характеризующие работу подводной АИС ПВ в режиме стробирования по дальности, представлены на рис. 7–10.

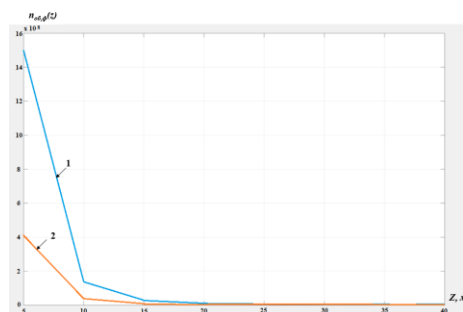


Рис. 7. Зависимость количества фотоэлектронов, генерируемых в одном пикселе излучением от объекта $n_{\text{об}}$ (кривая 1) и от фона $n_{\text{ф}}$ (кривая 2)

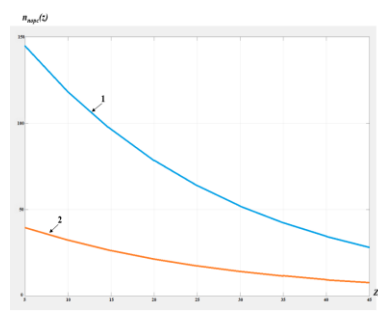


Рис. 8. Зависимость количества фотоэлектронов, генерируемых в одном пикселе помехой обратного рассеяния от объекта $n_{\text{ПОР об}}$ (кривая 1) и от фона $n_{\text{ПОР ф}}$ (кривая 2)

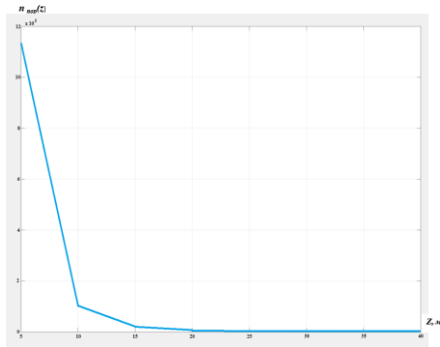


Рис. 9. Зависимость количества фотоэлектронов помехи обратного рассеяния от дальности

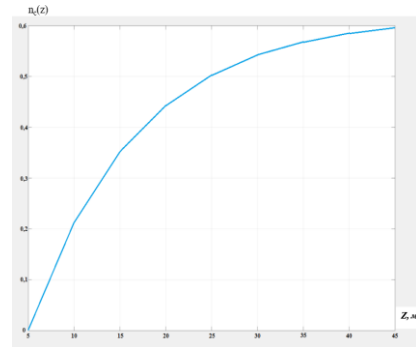


Рис. 10. Зависимость количества фотоэлектронов солнечной помехи обратного рассеяния от дальности

По графику зависимости прозрачности по белому диску от вероятности выживания фотона (рис. 11) находим вероятность выживания фотона.

По произведению показателя ослабления и Z_6 , находим показатель ослабления. Зная показатель ослабления ε и вероятность выживания фотонов Λ , находим по формуле показатель рассеяния σ :

$$\sigma = \varepsilon \cdot \Lambda.$$

Далее, используя график связи между коэффициентом асимметрии индикатрисы и показателем рассеяния, находим коэффициент асимметрии k_{ac} (рис. 12).

Значения среднего косинуса индикатрисы рассеяния, дисперсию малоугловой части индикатрисы рассеяния и долю света, рассеянную в заднюю полусферу, определим по формулам: $\overline{\cos(\theta)} = 1 - 2,9/(1 + k_{ac})$; $\overline{\theta_{45}^2} = 0.285 - 0.264 \overline{\cos(\theta)}$; $\overline{q_{45}^2} = 0.880 - 0.885 \overline{\cos(\theta)}$.

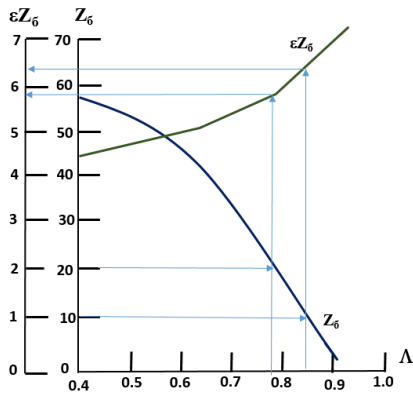


Рис. 11. Зависимость прозрачности по белому диску от вероятности выживания фотона

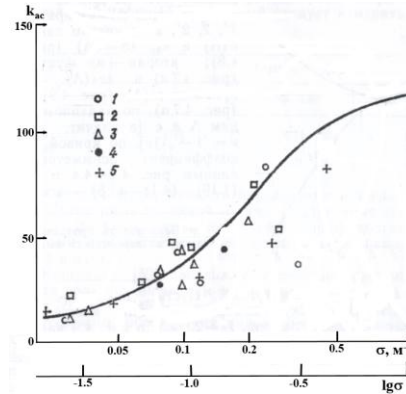


Рис. 12. Связь между коэффициентом асимметрии индикатрисы и показателем рассеяния

Полученные таким образом гидрооптические характеристики используются для оценочных расчетов дальности действия АИС ПВ при работе с борта ЛА по обнаружению подводных целей через границу «воздух-вода». Результаты, полученные в ходе расчетов, представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты расчетов гидрооптических характеристик

	Показатель ослабления, $\epsilon, \text{м}^{-1}$	Показатель рассеяния, $\sigma \text{м}^{-1}$	Вероятность выживания фотонов, Λ	Коэффициент асимметрии, k_{ac}	Значение параметра индикатрисы рассеяния
$Z_6 = 4 \text{ м}$	1,625	1,45	0,89	120	0,0678
$Z_6 = 8 \text{ м}$	0,78	0,69	0,87	НО	0,0671
$Z_6 = 10 \text{ м}$	0,63	0,53	0,85	107	0,0683
$Z_6 = 20 \text{ м}$	0,29	0,23	0,80	80	0,0713
$Z_6 = 40 \text{ м}$	0,11	0,07	0,66	30	0,0873

Как показали расчеты, из-за сильного ослабления света в морской воде АИС ПВ имеют небольшие дальности действия – менее 100 м даже в чистой воде. В воде довольно быстро наступает световой режим, при котором в отраженном сигнале преобладает составляющая, обусловленная рассеянным светом.

Использование полученных результатов расчета гидрооптических характеристик морской воды обеспечивает определение предельной дальности обнаружения подводных объектов АИС ПВ через границу раздела «воздух-вода».

На первом этапе определяется зависимость минимального разрешаемого контраста от угловой пространственной частоты $K_{min \text{ воспр.}} = f_1(v'_x)$. На втором этапе определяется зависимость наблюдаемого контраста от угловой пространственной частоты $K_{изобр} = f_3(v'_x)$. Пользуясь методикой пересчета угловых пространственных частот в дальность обнаружения определяются зависимости минимального разрешаемого контраста от угловой пространственной частоты $K_{min \text{ воспр.}} = f_2(z)$. На втором этапе определяется зависимость наблюдаемого контраста от угловой пространственной частоты $K_{изобр} = f_4(z)$. Проще всего определить предельную дальность обнаружения графическим способом, построив на одном графике зависимости $K_{min \text{ воспр.}} = f_2(z)$ и $K_{изобр} = f_4(z)$. Абсцисса точки пересечения этих кривых соответствует предельной дальности.

Одним из самых принципиальных вопросов для АИС ПВ является увеличение дальности обнаружения подводных целей и предельные возможности этого увеличения. Выделено несколько уровней восприятия, нижний из которых (обнаружение объекта) соответствует выделению какого-то размытого пятна на фоне помех, а высший уровень соответствует точной идентификации объекта (идентификация). В качестве параметра, характеризующего возможный уровень восприятия предложено использовать разрешение штриховых мир, эквивалентных объекту. При этом предполагается, что объект характеризуется неким минимальным размером $H_{крит}$, существенным для его восприятия. Каждому уровню видения сопоставлено число некоторых разрешаемых периодов эквивалентной миры, укладывающихся в пределах критического размера объекта. В таблице 6 приведены численные значения коэффициентов по критерию Джонсона, необходимых для вычисления требуемого числа периодов эквивалентной миры.

Таблица 6

Критерий Джонсона

Уровень видения	Описание	Nso	Вероятность восприятия	Множитель
Обнаружение	Выделение размытого пятна на фоне помех	1.0	1.00	3.0
			0.95	2.0
Распознавание	Объект выделяется с достаточной ясностью и дифференцируется по принадлежности к классу	4.0	0.80	1.5
			0.50	1.0
			0.30	0.75
			0.10	0.50
Идентификация	Объект дифференцируется по принадлежности к типу внутри класса	8.0	0.02	0.25

Значение N выбирают в соответствии с заданным уровнем и вероятностью восприятия, приведенными в табл. 7.

Таблица 7

Современные критерии визуального восприятия

Уровень видения	Описание	N
Обнаружение	Выделение размытого пятна на фоне помех	1.0
Различие	Объект выделяется с достаточной ясностью и дифференцируется по принадлежности к классу	4.0
Идентификация	Объект дифференцируется по принадлежности к типу внутри класса	8.0

Тогда при известном критическом размере объекта $H_{крит}$ и выбранном N дальность действия Z и угловая пространственная частота ν' эквивалентного тест-объекта связаны соотношением:

$$\nu' = \frac{z \cdot N}{H_{крит}}.$$

Значение N выбирается в соответствии с заданным уровнем и вероятностью восприятия. Тогда при известном критическом размере $H_{крит}$ подводного объекта и выбранном N дальность действия Z и угловая пространственная частота ν' эквивалентного тест-объекта связаны соотношением

$$Z = H_{крит} \cdot \nu' / N'. \quad (2)$$

Например, если требуется обнаружить подводный объект, имеющей критический размер 0.3 м с вероятностью 80%, то пользуясь данными таблицы и формулой (2) находим требуемое число периодов $N = (1 \cdot 1.5) = 1.5$. Подставив найденное значение в формулу (2) получим формулу для пересчета дальности через угловые пространственные частоты:

$$Z = 0.2 \cdot \nu'.$$

Полученное выражение будет использоваться при пересчете зависимостей: $K_{min \text{ воспр.}} = f_1(\nu'_x)$ в $K_{min \text{ воспр.}} = f_2(z)$, а также $K_{изобр} = f_3(\nu'_x)$ в $K_{изобр} = f_4(z)$.

Другой особенностью энергетического расчета АИС ПВ является наличие ЭОП III+ поколения в составе ФПМ приемного канала АИС ПВ, осуществляющего с высоким быстродействием многократное усиления яркости изображения, сформированного на фотокатоде. Многократно усиленное изображение, сформированное на экране ЭОП проецируется репродукционным объективом на фоточувствительную поверхность матричного фотоприемника (КМОП-матрицу). Для проведения расчета светозенергетических характеристик сигнальных и фоновых составляющих сигнала на выходе АИС ПВ определим число. Другой особенностью энергетического расчета АИС ПВ является наличие ЭОП III+ поколения в составе ФПМ приемного канала АИС ПВ, осуществляющего с высоким быстродействием многократное усиления яркости изображения, сформированного на фотокатоде. Многократно усиленное изображение, сформированное на экране ЭОП проецируется репродукционным объективом на фоточувствительную поверхность матричного фотоприемника (КМОП-матрицу). Для проведения расчета светозенергетических характеристик сигнальных и фоновых составляющих сигнала на выходе АИС ПВ определим число фотоэлектронов, генерируемых в одном пикселе КМОП-матрицы регистрируемым излучением от подводной цели $n_{ц}$, окружающего ее фона $n_{ф}$ и ПОР $n_{ПОР}$ по формулам:

$$n_{ц} = \frac{P_0 t_{им} S_{ФПУ} K_{опт} \rho_{ц} \alpha_{п}^2 r_{п}^2 \exp(-2\epsilon z(1 - \Lambda)) q_2}{4\mu^2 \Lambda \epsilon z^3 + (\alpha_{п}^2 + \alpha_{н}^2) z^2}$$

$$n_{ф} = \frac{P_0 t_{им} S_{ФПУ} K_{опт} \rho_{ф} \alpha_{п}^2 r_{п}^2 \exp(-2\epsilon z(1 - \Lambda)) q_2}{4\mu^2 \Lambda \epsilon z^3 + (\alpha_{п}^2 + \alpha_{н}^2) z^2}$$

$$n_{ПОР} = \left(\frac{\sigma x_{п} c \tau}{8n} \right) \frac{P_0 t_{им} S_{ФПУ} K_{опт} \rho_{ц} \alpha_{п}^2 r_{п}^2 \exp(-2\epsilon z(1 - \Lambda)) q_2}{4\mu^2 \Lambda \epsilon z^3 + (\alpha_{п}^2 + \alpha_{н}^2) z^2}.$$

Для расчета коэффициента преобразования были использованы следующие формулы:

$$S_{\text{ФПУ}} = P_{\text{сигн.}} \cdot M \cdot \frac{D^2}{4f^2} \cdot \tau_{\text{ро}} \cdot \frac{1}{\beta_{\text{ро}}^2} \cdot \kappa,$$

где M — коэффициент преобразования ЭОП;

$P_{\text{сигн.}}$ — мощность сигнала на 1 эквивалентный пиксель;

$\tau_{\text{ро}}$ — пропускание оптики;

$\beta_{\text{ро}}^2$ — квадрат линейного увеличения репродукционного объектива;

κ — квантовый выход матрицы.

$$M = \eta K_{\text{МКП}} \pi \gamma U \lambda_{\text{э}} \frac{0,62 \cdot 10^{19}}{683 \cdot 1,24} \left[\frac{\text{фотон}}{\text{Вт} \cdot \text{с} \cdot \text{пиксель}} \right]$$

η — квантовый выход ЭОП;

$K_{\text{МКП}}$ — коэффициент усиления МКП;

γ — светоотдача выходного экрана;

U — ускоряющее напряжение.

Для расчета коэффициента преобразования квантовый выход матрицы был выбран в соответствии с паспортными данными КМОП-матрицы «Baumer MXGC20», используемой в составе ФПМ типа «ФПМ-5-1».

Контраст изображения был рассчитан с учетом вносимых искажений водной среды и лазерной системы видения.

$$K_{\text{изобр}}(\nu') = \frac{n_{\text{об}} - n_{\text{ф}}}{n_{\text{об}} + n_{\text{ф}} + 2n_{\text{ПОР}}} \cdot \tilde{H}_{\text{АИС ПВ}}(\nu') \cdot \tilde{H}_{\text{воды}}(\nu'),$$

где $n_{\text{об}}, n_{\text{ф}}, n_{\text{ПОР}}$ — число фотоэлектронов от цели, от фона и ПОР;

$\tilde{H}_{\text{АИС ПВ}}(\nu')$ — МПФ лазерной системы видения;

$\tilde{H}_{\text{воды}}(\nu')$ — МПФ морской воды;

ν' — угловая пространственная частота.

Для определения наблюдаемого контраста подводной цели на окружающем фоне и при воздействии ПОР предварительно получено выражения для соотношения сигнал/шум.

$$\frac{C}{\text{Ш}} = \frac{n_{\text{об}} - n_{\text{ф}}}{\sqrt{n_{\text{об}} + n_{\text{ф}} + 2n_{\text{ПОР}}}} \tilde{H}_{\text{АИС ПВ}}(\nu') \cdot \tilde{H}_{\text{воды}}(\nu').$$

Выразив из формулы для сигнал/шума выражение $(n_{\text{об}} - n_{\text{ф}})$ и подставив его в контраст изображения, было получено соотношение для расчета минимально разрешаемого контраста:

$$K_{\text{min воспр.}}(\nu'_x) = \frac{C/\text{Ш}_{\text{min}}}{\sqrt{n_{\text{об}} + n_{\text{ф}} + 2n_{\text{ПОР}}}} \cdot \sqrt{\frac{\alpha_x \alpha_y}{q}} \cdot \nu'_x.$$

где α_x, α_y — угловой шаг пикселей по горизонтали и вертикали;

q — соотношение вертикального и горизонтального элементов мира;

$C/\text{Ш}_{\text{min}}$ выбираем равным 5.

В качестве примера, на рис. 13 представлены результаты расчета дальности обнаружения и распознавания подводных целей с размером $H = 2.5$ м для прозрачности морской воды по белому $Z_6 = 10$ м.

Проведенные расчеты предельной дальности обнаружения и распознавания подводных объектов с применением АИСПВ с борота ЛА через границу, «воздух-вода», выполненные по данной методике, для приведенных в статье исходных данных, показали, что в морской воде:

♦ с прозрачностью по белому диску $Z_6 = 10$ м, при максимальной средней энергии излучения (в импульсе на частоте 1 кГц) $W_{\text{опт}} = 50$ мДж дальность обнаружения подводного объекта (с критическим размером 2.5 м) $Z_{\text{об}} = 23,3$ м и дальность распознавания $Z_p = 10,1$ м;

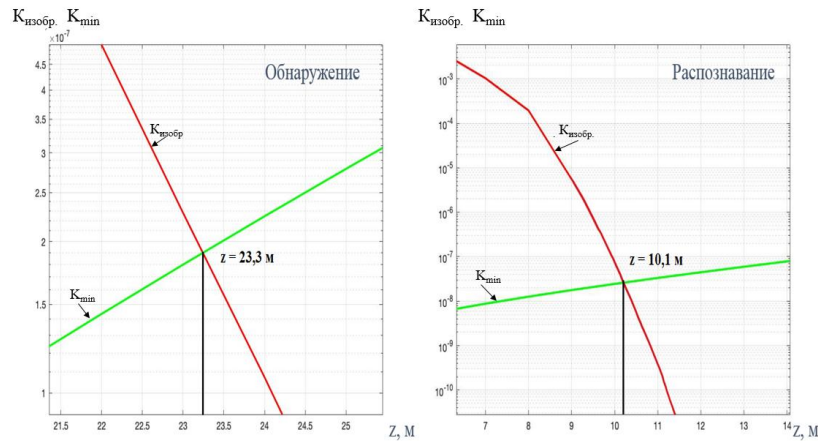


Рис. 13. Результаты определения предельной дальности обнаружения и распознавания подводных целей с помощью АИС ПВ (обнаружение подводной цели размером 2,5 м $Z = 23,3$ м, а распознавание $Z = 10,1$ м)

- ♦ с прозрачностью по белому диску $Z_6 = 20$ м, максимальной средней энергии излучения (в импульсе на частоте 1 кГц) $W_{\text{опт}} = 50$ мДж дальность обнаружения подводного объекта (с критическим размером 12,5 м) $Z_{\text{об}} = 42$ м;
- ♦ с прозрачностью по белому диску $Z_6 = 20$ м, максимальной средней энергии излучения (в импульсе на частоте 1 кГц) $W_{\text{опт}} = 50$ мДж дальность обнаружения подводного объекта (с критическим размером 12,5 м) $Z_{\text{об}} = 49,3$ м;
- ♦ с прозрачностью по белому диску $Z_6 = 20$ м, максимальной средней энергии излучения (в импульсе на частоте 1 кГц) $W_{\text{опт}} = 200$ мДж дальность обнаружения подводного объекта (с критическим размером 12,5 м) $Z_{\text{об}} = 52,3$ м.

В настоящее время для экспериментального подтверждения в натурных условиях проведенных расчетов дальности действия АИС ПВ был разработан и изготовлен ОАО «НПО Геофизика-НВ» макетный образец АИС ПВ, установленный в глубоководные боксы, внешний вид которого приведен на рис. 14.



Рис. 14. Внешний вид макетного образца АИС ПВ

Заключение:

1. Обнаружение и распознавание подводных объектов с борта ЛА через границу раздела «воздух-вода» по сформированному изображению стала возможным после завершения разработки быстродействующих фотоприемных устройств на основе ЭОП III+ поколения, высокочувствительных в спектральном диапазоне прозрачности морской воды, и высокоэффективных импульсных лазеров, излучающих в спектральном диапазоне прозрачности морской воды, и создания на их основе активно-импульсных оптико-телевизионных систем подводного видения (АИС ПВ).

2. Предельная дальность обнаружения и распознавание подводных объектов АИС ПВ с борта ЛА через границу раздела «воздух-вода» в основном определяется:

♦ затуханием оптического излучения в морской воде и практически обратно пропорционально показателю ослабления водной среды;

♦ мощностью подсвечивающего лазерного импульсного излучения, но отличительной особенностью работы АИС ПВ является увеличение дальности обнаружения и распознавания практически прямо пропорционально до определенного уровня мощности лазерного излучения, а дальнейшее увеличение мощности приводит к незначительному увеличению дальности, например, увеличение на порядок мощности подсвечивающего лазерного излучения приводит к увеличению дальности обнаружения подводного объекта всего на 10%–15%.

3. Одним из вариантов уменьшения помехи обратного рассеяния в АИС ПВ является наличие базы b – расстояние между приемным и подсвечивающим каналами АИС ПВ. Были рассмотрены различные варианты значения базы ($b = 0.5$ м, $b = 1$ м, $b = 5$ м и $b = 10$ м). Проведенные расчеты показали, что увеличение базы более 1 м не приводит к нужным результатам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tan Y.Z. et al. Overview of Chinese and American marine airborne LiDAR // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2020. – Vol. 42. – P. 111-115.
2. Mariani P. Range-Gated Imaging System for Underwater Monitoring in Ocean Environment Quincoces // Sustainability. – 2019. – 11, 162. – P. 1-13.
3. Tulldahl H.M., Pettersson M. Lidar for shallow underwater target detection // Electro-optical remote sensing, detection, and photonic technologies and their applications. – SPIE, 2007. – Vol. 6739. – P. 55-66.
4. Rumbaugh L.K. et al. A 532 nm chaotic lidar transmitter for high resolution underwater ranging and imaging // 2013 OCEANS-San Diego. – IEEE, 2013. – P. 1-6.
5. DeWeerts M.J. Detection of Underwater Military Munitions by a Synoptic Airborne Multi-Sensor System // BAE Systems Spectral Solutions, Honolulu (HI). – 2010.
6. Birkeland J. The potential of lidar as an antisubmarine warfare sensor: diss. – University of Glasgow, 2009.
7. Swain R., Easton R. Sea mines: the low-end threat in the high-end fight // Proceedings Products, August. – 2021. – Vol. 147/8/1,422.
8. Карасик В.Е., Орлов В.М. Локационные лазерные системы видения. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 480 с. – ISBN 978-5-7038-3667-5.
9. Грузевич Ю.К., Альков П.С., Балясный Л.М., Чистов О.В. Лазерная оптико-телевизионная активно-импульсная система подводного видения // Подводные исследования и робототехника. – 2024. – № 3 (49). – С. 62-75.
10. Maccarone A. Submerged single-photon lidar imaging sensor used for real-time 3d scene reconstruction in scattering underwater environments // School of Engineering and Physical Sciences, Heriot-Watt University, Edinburgh EH14 4AS, UK.
11. Лучинин А.Г., Сергиевская И.А. О флуктуациях светового поля под взволнованной поверхностью моря // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1982. – Т. 18, № 8. – С. 850-858.
12. Лучинин А.Г. О некоторых свойствах сигнала обратного рассеяния при лазерном зондировании верхнего слоя океана через взволнованную поверхность // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1987. – Т. 23, № 9. – С. 976-983.
13. Вебер В.Л. О влиянии волнения на качество изображения подводного объекта, полученного при наблюдении через морскую поверхность // Оптика атмосферы и океана. – 1992. – Т. 5, № 8. – С. 869-875.
14. Вебер В.Л., Лучинин А.Г. Влияние корреляционных эффектов на характеристики изображения дна водоема, наблюдаемого через взволнованную поверхность // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 2001. – Т. 37, № 2. – С. 257-264.
15. Вебер В.Л., Лучинин А.Г. О дисперсии флуктуации изображений при наблюдении через взволнованную поверхность // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1983. – Т. 19, № 6. – С. 631-638.
16. Лучинин А.Г. Отношение сигнал/шум в изображении дна водоема, наблюдаемого через взволнованную поверхность // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1986. – Т. 22, № 2. – С. 195-201.
17. Лучинин А.Г. Об основных принципах формирования изображения подводных объектов при наблюдении через взволнованную поверхность // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1996. – Т. 32, № 2. – С. 296-302.

18. Лучинин А.Г. Функции распределения сигнала в изображениях самосветящихся подводных тест-объектов, наблюдаемых через взволнованную поверхность // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 38, № 3. – С. 419-425.
19. Лучинин А.Г. Вероятностная трактовка расщепления изображений подводных объектов. – Н. Новгород: Ин-т прикладной физики РАН, 2002.
20. Долин Л.С., Левин И.М. Справочник по теории подводного видения. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 229 с.
21. Оптика океана. Т. 2 Прикладная оптика океана / под ред. А.С. Мониной. – М.: Наука, 1983. – 236 с.

REFERENCES

1. Tan Y.Z. et al. Overview of Chinese and American marine airborne LiDAR, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, Vol. 42, pp. 111-115.
2. Mariani P. Range-Gated Imaging System for Underwater Monitoring in Ocean Environment *Quincoces, Sustainability*, 2019, 11, 162, pp. 1-13.
3. Tulldahl H.M., Pettersson M. Lidar for shallow underwater target detection, *Electro-optical remote sensing, detection, and photonic technologies and their applications*. SPIE, 2007, Vol. 6739, pp. 55-66.
4. Rumbaugh L.K. et al. A 532 nm chaotic lidar transmitter for high resolution underwater ranging and imaging, *2013 OCEANS-San Diego*. IEEE, 2013, pp. 1-6.
5. DeWeerts M.J. Detection of Underwater Military Munitions by a Synoptic Airborne Multi-Sensor System, *BAE Systems Spectral Solutions, Honolulu (HI)*, 2010.
6. Birkeland j. The potential of lidar as an antisubmarine warfare sensor: diss. University of Glasgow, 2009.
7. Swain R., Easton R. Sea mines: the low-end threat in the high-end fight, *Proceedings Products, August*, 2021, Vol. 147/8/1, 422.
8. Karasik V.E., Orlov V.M. Lokatsionnye lazernye sistemy videniya [Location laser vision systems]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2013, 480 p. ISBN 978-5-7038-3667-5.
9. Gruzevich Yu.K., Al'kov P.S., Balyasnyy L.M., Chistov O.V. Lazernaya optiko-televizionnaya aktivno-impul'snaya sistema podvodnogo videniya [Laser optical-television active-pulse system of underwater vision], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2024, No. 3 (49), pp. 62-75.
10. Maccarone A. Submerged single-photon lidar imaging sensor used for real-time 3d scene reconstruction in scattering underwater environments, *School of Engineering and Physical Sciences, Heriot-Watt University, Edinburgh EH14 4AS, UK*.
11. Luchinin A.G., Sergievskaya I.A. O fluktuatsiyakh svetovogo polya pod vzvolnovannoy poverkhnost'yu morya [On fluctuations of the light field under the rough sea surface], *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya AN SSSR. Physics of the atmosphere and ocean], 1982, Vol. 18, No. 8, pp. 850-858.
12. Luchinin A.G. O nekotorykh svoystvakh signala obratnogo rasseyaniya pri lazernom zondirovanii verkhnego sloya okeana cherez vzvolnovannuyu poverkhnost' [On some properties of the backscattering signal in laser sounding of the upper ocean layer through a rough surface], *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya AN SSSR. Physics of the atmosphere and ocean], 1987, Vol. 23, No. 9, pp. 976-983.
13. Veber V.L. O vliyaniy volneniya na kachestvo izobrazheniya podvodnogo ob"ekta, poluchennogo pri nablyudenii cherez morskuyu poverkhnost' [On the influence of waves on the quality of the image of an underwater object obtained by observation through the sea surface], *Optika atmosfery i okeana* [Optics of the atmosphere and ocean], 1992, Vol. 5, No. 8, pp. 869-875.
14. Veber V.L., Luchinin A.G. Vliyanie korrelyatsionnykh effektov na kharakteristiki izobrazheniya dna vodoema, nablyudaemogo cherez vzvolnovannuyu poverkhnost' [Luchinin. Influence of correlation effects on the characteristics of the image of the bottom of a reservoir, observed through a rough surface], *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya AN SSSR. Physics of the atmosphere and ocean], 2001, Vol. 37, No. 2, pp. 257-264.
15. Veber V.L., Luchinin A.G. O dispersii fluktuatsii izobrazheniy pri nablyudenii cherez vzvolnovannuyu poverkhnost' [On the dispersion of image fluctuations when observing through a rough surface], *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya AN SSSR. Physics of the atmosphere and ocean], 1983, Vol. 19, No. 6, pp. 631-638.
16. Luchinin A.G. Otnoshenie signal/shum v izobrazhenii dna vodoema, nablyudaemogo cherez vzvolnovannuyu poverkhnost' [Signal/noise ratio in the image of the bottom of a reservoir observed through a disturbed surface], *AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya AN SSSR. Physics of the atmosphere and ocean], 1986, Vol. 22, No. 2, pp. 195-201.

17. Luchinin A.G. Ob osnovnykh printsipakh formirovaniya izobrazheniya podvodnykh ob"ektov pri nablyudenii cherez vzvolnovannuyu poverkhnost' [On the basic principles of forming an image of underwater objects when observed through a rough surface], *AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya AN SSSR. Physics of the atmosphere and ocean], 1996, Vol. 32, No. 2, pp. 296-302.
18. Luchinin A.G. Funktsii raspredeleniya signala v izobrazheniyakh samosvetyashchikhsya podvodnykh test-ob"ektov, nablyudaemykh cherez vzvolnovannuyu poverkhnost' [Signal distribution functions in images of self-luminous underwater test objects observed through a rough surface], *AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya AN SSSR. Physics of the atmosphere and ocean], 2002, Vol. 38, No. 3, pp. 419-425.
19. Luchinin A.G. Veroyatnostnaya traktovka rasshepleniya izobrazheniy podvodnykh ob"ektov [Probabilistic interpretation of splitting of images of underwater objects]. Nizhniy Novgorod: In-t prikladnoy fiziki RAN, 2002.
20. Dolin L.S., Levin I.M. Spravochnik po teorii podvodnogo videniya [Handbook of the theory of underwater vision]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991, 229 p.
21. Optika okeana. T. 2. Prikladnaya optika okeana [Ocean Optics. Vol. 2. Applied Ocean Optics], pod red. A.S. Monina. Moscow: Nauka, 1983, 236 p.

Грузевич Юрий Кириллович – Открытое акционерное общество «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ»; e-mail: yukg@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74957635492; к.т.н.; доцент; зам. генерального директора по науке.

Гордиенко Юрий Николаевич – Открытое акционерное общество «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ»; e-mail: yuriy194421@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74957635492; зам. технического директора.

Альков Павел Сергеевич – Открытое акционерное общество «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ»; e-mail: pavel_alkov@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79160586015; к.т.н.; доцент; зам. технического директора – начальник отдела 047.

Волков Дмитрий Владимирович – Открытое акционерное общество «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ»; e-mail: mitya_volkov_7554@bk.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79859521503; ведущий инженер.

Ходаковская Мария Сергеевна – Открытое акционерное общество «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ»; e-mail: mariya.xabarova.96@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79636095192; инженер.

Gruzevich Yuri Kirillovich – Open Joint-Stock Company “NPO GEOFIZIKA-NV”; e-mail: yukg@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +74957635492; cand. of eng. sc.; associate professor; deputy general director for science.

Gordienko Yuri Nikolaevich – Open Joint-Stock Company “NPO GEOFIZIKA-NV”; e-mail: yuriy194421@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +74957635492; deputy technical director.

Alkov Pavel Sergeevich – Open Joint-Stock Company “NPO GEOFIZIKA-NV”; e-mail: pavel_alkov@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79160586015; cand. of eng. sc.; associate professor; deputy technical director – head of department 047.

Volkov Dmitry Vladimirovich – Open Joint-Stock Company “NPO GEOFIZIKA-NV”; e-mail: mitya_volkov_7554@bk.ru; Moscow, Russia; phone: +79859521503; lead engineer.

Khodakovskaya Maria Sergeevna – Open Joint-Stock Company “NPO GEOFIZIKA-NV”; e-mail: mariya.xabarova.96@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79636095192; engineer.

УДК 007.52

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-256-268

Н.В. Ким, Н.Е. Бодунков, Д.С. Гиренко, Н.А. Ляпин, Н.В. Удалова

ВИЗУАЛЬНАЯ НАВИГАЦИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕМАНТИЧЕСКИХ ОПИСАНИЙ МЕСТНОСТИ

Рассматривается задача визуальной навигации беспилотных летательных аппаратов (БЛА), которая заключается в автоматическом определении текущего положения БЛА (координат в земной (местной) системе координат), на основе сравнения и идентификации описаний принимаемых на борту текущих изображений (ТИ) подстилающей поверхности и эталонных описа-

ний, хранящихся в виде цифровой карты местности в памяти бортового вычислителя БЛА. Целью работы является повышение эффективности применения методов визуальной навигации, с точки зрения повышения вычислительной производительности, устойчивости и точности алгоритмов идентификации изображений в сложных и изменяемых условиях наблюдения, за счет использования семантических описаний наблюдаемых сцен. В данной работе под семантическими описаниями будем понимать описания, включающие классы наблюдаемых на сцене объектов, атрибуты этих объектов и отношениями между ними. Подготовка семантических описаний карты производится на этапе предполетной подготовки БЛА с помощью предварительно обученных нейронных сетей семантической сегментации. Семантические описания принимаемых ТИ формируются на борту БЛА. При этом использование нейросетевых алгоритмов позволяет реализовать этот процесс в реальном времени для широкого спектра условий наблюдений (различного времени суток и года). Использование семантических описаний карты и ТИ позволяет сократить вычисления по сравнению с традиционным попиксельным сопоставлением растровых изображений. Семантические описания сравниваются путем сопоставления классов объектов, их атрибутов и отношений. В работе приведены: общий алгоритм визуальной навигации, основные этапы методики формирования семантических описаний и алгоритм сравнения и идентификации семантических описаний ТИ и описаний карты. Предложен иерархический алгоритм сравнения и идентификации изображений, основанный на последовательном применении семантических, и растровых описаний наблюдаемых сцен. Показано, что использование процедуры сравнения семантических описаний ТИ и карты по присутствующим классам объектов позволяет существенно сократить вычисления, необходимые для идентификации изображений.

Навигационные системы; визуальная навигация; семантическая навигация; системы технического зрения.

N.V. Kim, N.E. Bodunkov, D.S. Girenko, N.A. Lyapin, N.V. Udalova

VISUAL NAVIGATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES USING SEMANTIC TERRAIN DESCRIPTIONS

The article addresses the problem of visual navigation for unmanned aerial vehicles (UAVs), which involves the automatic determination of the current position of the UAV (coordinates in the ground (local) coordinate system) based on the comparison and identification of descriptions of the current images (CI) received on board with reference descriptions stored in the form of a digital map in the memory of the UAV's onboard computer. The aim of this work is to improve the efficiency of visual navigation methods in terms of increasing computational performance, robustness, and accuracy of image identification algorithms in complex and changing observation conditions by using semantic descriptions of observed scenes. In this work, semantic descriptions are understood as descriptions that include classes of objects observed in the scene, their attributes, and relationships between them. The preparation of semantic descriptions of the map is carried out at the pre-flight preparation stage of the UAV using pre-trained neural networks for semantic segmentation. Semantic descriptions of the received CIs are generated on board the UAV. The use of neural network algorithms allows this process to be implemented in real-time for a wide range of observation conditions (different times of day and year). The use of semantic descriptions of the map and CI reduces computations compared to traditional pixel-by-pixel matching of raster images. Semantic descriptions are compared by matching object classes, their attributes, and relationships. The work presents a general algorithm for visual navigation, the main stages of the methodology for forming semantic descriptions, and the algorithm for comparing and identifying semantic descriptions of CIs and map descriptions. A hierarchical algorithm for comparing and identifying images based on the sequential application of semantic and raster descriptions of observed scenes is proposed. It is shown that the use of the procedure for comparing semantic descriptions of CIs and maps by the classes of objects present significantly reduces the computations necessary for image identification.

Navigation systems; visual navigation; semantic navigation; machine vision systems.

Введение. Методы визуальной навигации могут эффективно использоваться в различных полетных ситуациях, в частности, при неустойчивой работе спутниковой навигационной системы [1, 2]. Внедрение визуальной навигации расширяет возможности автономного полёта беспилотных летательных аппаратов (БЛА), что позволяет значительно повысить эффективность выполнения решаемых задач, снизить затраты на управление и обслуживание аппаратов, а также минимизировать риски, связанные с ошибками оператора.

Целью настоящей работы является повышение эффективности решения, с точки зрения повышения вычислительной производительности, устойчивости и точности, задачи визуальной навигации в сложных и изменяемых условиях наблюдения подстилающей поверхности.

В рамках данного исследования будем считать, что задача визуальной навигации заключается в определении текущего положения беспилотного летательного аппарата (БЛА), т.е. координат БЛА, с заданной точностью, в земной (местной) системе координат XOY. Высота полета определяется с помощью бортового высотомера.

Будем считать, что полет беспилотного летательного аппарата проходит в области отсутствия сигналов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Коррекция бортовой инерциальной навигационной системы (ИНС) БЛА производится с помощью методов визуальной навигации [1], позволяющих определять координаты БЛА на основе сопоставления и идентификации принимаемых на борту текущих изображений (ТИ) подстилающей поверхности и эталонных изображений (ЭИ), хранящихся в виде цифровой карты местности (ЦКМ) в вычислительной системе БЛА [3, 4].

К основным проблемам реализации методов визуальной навигации БЛА, связанным с сопоставлением ТИ и ЭИ, относятся изменяемые условия наблюдения, в частности изменения освещенности, погодных условий, искажающие принимаемые ТИ относительно ЭИ.

Кроме того, реализацию методов визуальной навигации затрудняет высокая трудоемкость вычислений, связанных с необходимостью обработки объемных растровых изображений подстилающей поверхности, выделением, оценкой и сопоставлением необходимых признаков [5, 6].

В последние годы в различных задачах обнаружения и распознавания начинают использоваться нейросетевые алгоритмы. Формирование рабочего признакового пространства и выделение признаков в них реализуется автоматически в процессе обучения. Данный факт позволяет перейти на новые методы описания наблюдаемых сцен и повысить производительность обработки текущих изображений.

В качестве одного из вариантов решения этих проблем предлагается в отдельных процессах сопоставления ТИ и ЭИ перейти от использования растровых изображений наблюдаемых сцен к их семантическим описаниям. В данной работе под семантическими описаниями будем понимать описания наблюдаемых сцен присутствующими на них классами объектов, их атрибутами и отношениями между ними. Классификация объектов производится с помощью нейронных сетей семантической сегментации [9, 14].

Предполагается, что подобный переход существенно повысит устойчивость алгоритмов визуальной навигации к изменению условий наблюдения и вычислительную производительность вычислений.

Визуальная навигация БЛА. При использовании методов визуальной навигации оценка положения БЛА производится на основе сопоставления изображений: принимаемого на борту ТИ и подготовленного заранее ЭИ. Вероятность получения конкретного ТИ может оцениваться на основе времени полета БЛА без коррекции и расчета накопленных ошибок БИНС [7, 8].

В общем случае изображения содержат наблюдаемые сцены. В частных случаях на наблюдаемых сценах могут присутствовать неинформативные (с т.з. визуальной навигации) или информативные изображения объектов, позволяющие однозначно определять положение БЛА.

Задача привязки изображений (ТИ и ЭИ) относится к известным задачам поиска и обнаружения объектов [6], которыми являются фрагменты ЭИ, соответствующие ТИ.

В общем случае для поиска искомого участка местности или ориентира может использоваться не только исходное принятое растровое изображение, а некоторое описание, позволяющее идентифицировать этот участок. Растровые изображения являются частным случаем эталонного и текущего описаний и используются в корреляционных алгоритмах.

Другим вариантом описаний является, например, признаковое описание, в частности, на основе семантических описаний, ключевых точек и др.

Очевидно, что для сопоставления эталонного и текущего описаний подстилающей поверхности (местности) они должны быть представлены в едином формате.

Общий алгоритм оценки координат БЛА с использованием визуальной навигации может быть представлена в следующем виде (рис. 1).

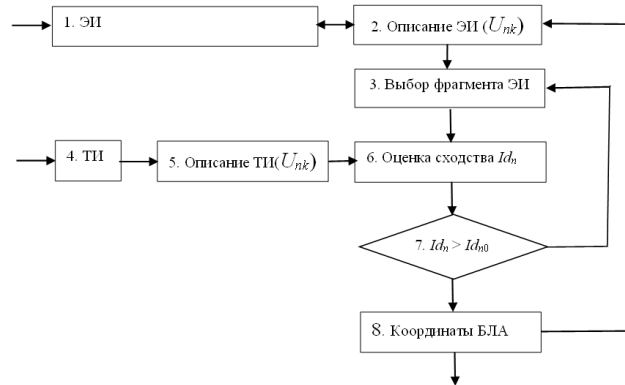


Рис. 1. Алгоритм оценки координат БЛА

На первом этапе (бл.1) определяется область местности, в которой с вероятностью отличной от нуля может находиться БЛА. Необходимо отметить, что на этапе предполетной подготовки ЦКМ может быть преобразовано в признаковое (в частности, семантическое) описание.

В бл.2 формируется описание ЭИ с учетом выбранного пространства признаков (распределения яркости, характерных черт и т.д.) U_{nk} , где n – индекс признака, k – индекс значения n -го признака.

Например, если выбрано распределение яркости изображения, то сходство ТИ и ЭИ может оцениваться корреляционной функцией [3, 4]. В этом случае в качестве сравниваемых описаний ЭИ и ТИ используются растровые изображения.

Если в качестве характерных признаков используются ключевые точки [1], то в бл.2 и бл.5 необходимо реализовать процедуры поиска этих точек.

Из принятого ТИ (бл.4) формируется описание (бл.5), базирующееся на соответствующих признаках.

В бл.3 из ЭИ выделяется фрагмент, который должен сравниваться с принятым текущим изображением. Выбор фрагмента ЭИ производится на основе выбранного метода поиска.

В бл.6 производится оценка сходства ТИ и ЭИ путем расчета некоторого выбранного показателя Id_n , где n – индекс показателя, зависящего от выбранного описания изображений. В частности, такими показателями могут быть корреляционная функция, парные функции [Ким], расстояние Махаланобиса или Хэмминга и др.

Пусть увеличение Id_n соответствует увеличению сходства сравниваемых описаний, тогда выполнение условия (бл.7)

$$Id_n \geq Id_{n0} \quad (1)$$

определяет идентичность описаний ТИ и ЭИ, где Id_{n0} – заданный порог.

При $Id_n < Id_{n0}$ (бл.7), необходимо перейти к другому фрагменту ЭИ (бл.2).

Если найден фрагмент ЭИ, идентичный принятому ТИ (1), то расчет поиска заканчивается (бл.18).

Координаты БЛА определяются, исходя из известных: положения системы наблюдения (камеры) на борту БЛА, параметров камеры, направления линии визирования, высоты полета и координат найденного фрагмента ЭИ.

Наиболее распространенными методами, реализуемыми в визуальной навигации приведенным алгоритмом (рис.1), являются корреляционно-экстремальные методы [2–5].

Преимущества данного подхода связаны с простотой реализации и высокими качествами пространственной фильтрации, свойственной обработке растровых изображений. При этом нет необходимости выделять рабочие признаки объектов, что повышает сложность алгоритма.

К недостаткам корреляционных алгоритмов можно отнести высокую чувствительности к изменению условий наблюдения и относительно низкую вычислительную производительность.

Семантические описания наблюдаемых сцен. Для повышения устойчивости и вычислительной производительности алгоритма поиска ТИ на ЭИ предлагается использовать вариант семантического описания наблюдаемых сцен.

В рамках данного описания признаками, позволяющими сравнивать схожесть и идентифицировать наблюдаемые сцены, являются классы объектов, их атрибуты, отношения между ними.

Классами объектов могут быть, например, здания, дороги, лес водная поверхность и пр.

Атрибутами объектов являются форма, размеры, текстура и пр.

В качестве *отношений между объектами* могут использоваться относительные положения объектов.

С развитием вычислительной техники и алгоритмов глубокого обучения, архитектуры сверточных искусственных нейронных сетей (НС) научились решать задачи обнаружения и распознавания искомым объектов на различных наблюдаемых сценах в режиме реального времени [9–11]. Данный факт позволяет прогнозировать существенное повышение производительности подобных алгоритмов поиска по сравнению с алгоритмами, построенными на обработке и анализе растровых изображений [18–20].

Также преимущество нейросетевых решений состоит в том, что за счет достаточно большой обучающей выборки и обучения НС на этапе предполетной подготовки можно добиться высокой устойчивости к изменению условий наблюдения, включая изменения освещенности, ракурса и масштаба наблюдаемых сцен.

Существенным недостатком предлагаемого подхода является необходимость подготовки и использования больших обучающих выборок (несколько десятков тысяч изображений на один класс объектов).

Базовой процедурой формирования семантических описаний наблюдаемых сцен является семантическое сегментирование изображения. Исходя из наблюдений последних лет, в настоящее время, несмотря на увеличивающийся прогресс в использовании сложных дескрипторов изображений [8] и более совершенных методов машинного обучения, сегментация по-прежнему остается сложной задачей.

Семантическая сегментация изображений – это процесс разделения изображения на области, где каждая область соответствует семантическому классу из заранее определенного списка [9] (алфавиту классов). Внешний вид этих классов изучается с помощью размеченных изображений. Методы обычно объединяют две подзадачи: часть распознавания, отвечающая за маркировку, и часть регуляризации, которая заставляет соседние пиксели принадлежать к одному классу. Часть распознавания основана на локальном внешнем виде, который рассматривается на уровне пикселя или на уровне участка. Для описания локального внешнего вида используются различные признаки, среди которых текстура (банки фильтров) и цветовая статистика.

Основным инструментом решения данного класса задач являются сверточные нейронные сети (СНС, CNN) [10]. При этом, в настоящее время существует огромное разнообразие таких архитектур, позволяющих решить задачу семантической сегментации изображений [11]. Большинство успешных алгоритмов семантической сегментации, разработанных в предыдущем десятилетии, опирались в основном на обычные классификаторы, такие как boosting [12], случайные леса [13] или методы опорных векторов [14]. Однако, за последние несколько лет достижения в области глубокого обучения классификации изображений были адаптированы в задачу семантической сегментации.

Базовыми архитектурами для решения задачи сегментации изображений являются архитектуры FCN, Seg-net, U-net. Для них проведена сравнительная характеристика их работы по метрике IoU (Intersection over Union) или индекс Жаккара (Jaccard index) для одного и того же датасета с изображениями спутниковых снимков, представленного ниже.

$$IoU = \frac{TP}{TP+FP+FN}, \quad (2)$$

где TP – количество правильно проклассифицированных пикселей на изображении (true positives), FP – количество пикселей, которые метод проклассифицировал как принадлежащие определенному классу, но они таковыми не являются (false positives), FN – количество пикселей, которые принадлежат определенному классу, но метод проклассифицировал их как не принадлежащие этому классу (false negatives). Значения TP , FP , FN вычисляются на основе известной матрицы ошибок [15].

В табл. 1, представлены результаты работы сравниваемых сетей.

Таблица 1

Сравнительная характеристика основных архитектур СНС для решения задачи семантической сегментации

Модель	IoU , %
FCN	65.3
Seg-net	57
U-net	76.4

Потери нейронной сети оценивались на основе двух функций:

♦ **Diceloss** – метрика, которая показывает меру несходства между предсказанной и истинной сегментацией изображения.

$$DICE = \frac{2*TP}{2*TP+FP+FN}, \quad (3)$$

♦ **CategoricalFocalLoss** – метрика, вычисляющая альфа-сбалансированную фокальную потерю кроссэнтропии.

$$FL = (1 - pr)^\gamma * \log(pr), \quad (4)$$

где pr – предсказанный класс, γ – параметр фокусировки. Когда $\gamma = 0$, фокусировка не влияет на перекрестную энтропию.

Точность модели определялась на основе следующих метрик:

♦ **Accuracy** – точность модели, рассчитывается как количество правильно предсказанных классов, разделенное на общее количество объектов.

$$accuracy = \frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN}, \quad (5)$$

♦ **Jaccard coefficient** – коэффициент рассчитывается как количество общих элементов в двух классах (A и B), разделённое на общее количество элементов в любом из классов.

$$Jaccard_{coef}(A, B) = \frac{A \cap B}{A \cup B}. \quad (6)$$

Исходя из полученных выше результатов, в качестве исходного датасета был размечен фрагмент карты одного из районов Санкт-Петербурга, который был размечен семантической сегментацией по пикселям в 5 классах. Общий объем набора данных составляет 20735 трехканальных изображения размером 256 x 256 пикселей.

Алфавит классов и цвет разметки:

1. Здание (З), розовый.
2. Поверхность (П) (грунтовая территория), черный.
3. Дорога (Д), серый.
4. Растительность (Р), зеленый.
5. Вода (В), синий.

На рис. 2 приведен график изменения функции потерь по эпохам после обучения нейронной сети U-net:

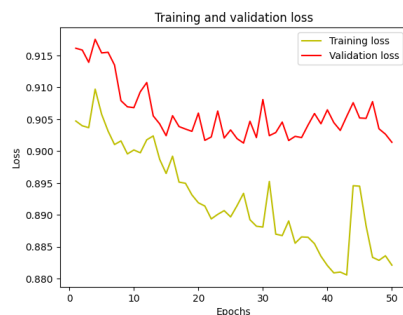


Рис. 2. График изменения функции потерь

После работы нейронной сети для каждого изображения можно определить матрицу вероятностей распознавания по каждому из классов. Для этого необходимо определить количество пикселей ($N_i, i = \overline{1..5}$), где i – номер класса, соответствующих каждому классу на истинной маске изображения. Далее необходимо определить на сегментированном изображении количество пикселей, которые соответствуют данному классу (N_{iTrue}) при по-пиксельном сравнении двух изображений (истинной и сегментированной маски) и определить вероятность $P(U_i \setminus U_i), i = \overline{1..5}$ правильного распознавания класса U_i .

$$P(U_i \setminus U_i) = \frac{N_{iTrue}}{N_i}, i = \overline{1..5}. \quad (7)$$

Затем необходимо определить условные вероятности ($P(U_i \setminus U_j), i = \overline{1..5}, j = \overline{1..5}, i \neq j$) распознавания i -го класса, при условии, что на сегментированном изображении в соответствующем пикселе был определен другой класс. Для этого, по каждому из оставшихся классов (за исключением искомого) необходимо определить количество неверно распознанных пикселей ($N_{ijFalse}$).

$$P(U_i \setminus U_j) = \frac{N_{ijFalse}}{N_i}, i = \overline{1..5}. \quad (8)$$

Пример изображения приведен на рис. 3.

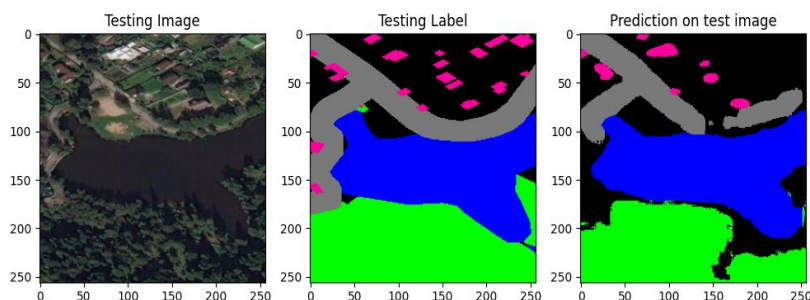


Рис. 3. Пример сегментированного изображения

Идентификация семантических описаний наблюдаемых сцен. Для примера будем считать, что ТИ имеет меньший размер, чем ЭИ.

В большинстве случаев, например, в корреляционно-экстремальных навигационных системах (КЭНС) для поиска положения ТИ (размерностью в пикселях $m*n$) на ЭИ ($M*N$) производится попиксельное обследование всего ЭИ (метод сплошного поиска). При этом количество реализуемых вычислительных операций для принятого ТИ и всего ЭИ равно

$$K\Sigma = mn(M - n + 1)(N - n + 1)K_o, \quad (9)$$

где K_o – количество элементарных вычислительных операций в одном цикле обработки изображений, в частности, для расчета выбранной критериальной корреляционной функции, но без расчета ее экстремума [4].

Для каждой сравниваемой пары изображений вычисляется показатель, значение которого определяет сходство изображений. Например, в КЭНС могут использоваться такие функции, как нормированный коэффициент корреляции или функция среднего модуля разности и пр. [4, 5]. Координаты ЭИ, при которых корреляционная функция достигает экстремума, определяют фрагмент, максимально похожий на ТИ.

Реализация на борту БЛА подобных вычислительных процессов оказывает существенную (в ряде случаев недопустимую) нагрузку на бортовые вычислители, поэтому повышение вычислительной эффективности (производительности) алгоритмов поиска и сравнения изображений является актуальной и практически значимой задачей.

Принципиальным отличием семантического описания наблюдаемых сцен от растрового является наличие в семантических описаниях выделенных классов объектов, присутствующих на сценах. Данные объекты, а также различные атрибуты объектов и отношения (в частности, геометрические) между объектами являются, в общем случае, признаками наблюдаемых сцен.

Использование семантических описаний позволяет реализовать метод выборочного сканирования ЭИ на основе использования некоторого выбранного рабочего словаря признаков для сравнения ЭИ и ТИ.

Например, в данном методе ТИ сравнивается только с фрагментами ЭИ, имеющими близкий состав по классам объектов наблюдаемой сцены. Остальные области ЭИ не рассматриваются.

Как было отмечено выше, важнейшим вопросом использования семантических описаний является выбор наиболее схожей пары и определением координат ТИ на ЭИ (идентификация ТИ).

Удобным подходом к оценке сходства изображений является использование парных функций [4, 5], ориентированных на обработку растровых изображений.

Реализация данных функций в растровых изображениях связана с вычислением количества элементов ТИ и ЭИ, совпадающих или несовпадающих по значению, т.е. значений яркости в соответствующих пикселях.

В частности, для бинарных растровых изображений предложен ряд парных критериевых функций, например, функции Рао, Джекарда, Юла и др. Предварительные исследования показали высокую эффективность функции Джекарда

$$K_D = \frac{a}{(a+b+c)}, \quad (10)$$

где a, e – количество совпадающих элементов с D значениями соответственно в ТИ и ЭИ (1,1) и (0,0); b, c – количество несовпадающих элементов со значениями соответственно (1,0) и (0,1).

Обозначим K_{PD} – количество элементарных вычислительных операций, необходимых для расчета функции Джекарда.

В случае использования семантических описаний авторами предлагается иной подход применения парных функций:

- ♦ наличие некоторого класса объектов (в общем случае признака) в описании обозначается «1», а отсутствие признака – «0»;
- ♦ сопоставление двух изображений проводится на основе расчета совпадающих или несовпадающих признаков на этих изображениях.

Так, « a » (10) может интерпретироваться, как присутствие на 2-х изображениях одинаковых признаков: классов объектов, отношений или атрибутов.

Подобный подход позволяет существенно сократить количество сравниваемых фрагментов ЭИ с ТИ. Однако выбранный словарь признаков может оказаться недостаточным для требуемой идентификации ТИ на ЭИ.

Обозначим S_0 начальную область поиска, соответствующую ЭИ, и S_i – области неопределенности положения ТИ после i -го этапа поиска.

В случае появления альтернативных вариантов решений, т.е. нахождения на ЭИ нескольких фрагментов, похожих на ТИ, производится расширение набора используемых признаков. Процесс идентификации должен повторяться до тех пор, пока вероятность принятия правильного решения не достигнет требуемого (заданного) значения.

На рис. 4 показан пример алгоритма иерархической идентификации ТИ на ЭИ.

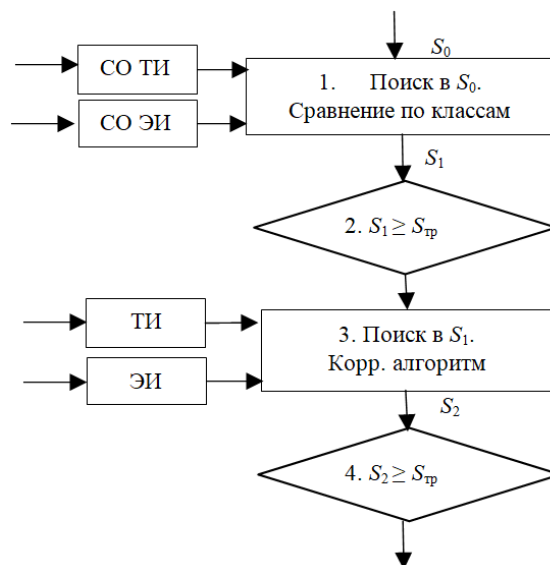


Рис. 4. Алгоритм иерархической идентификации ТИ

В бл.1 производится сравнение семантических описаний (СО ТИ и СО ЭИ), в результате которого начальная область поиска S_0 сокращается до области S_1 .

Если полученная точность идентификации, характеризующая S_1 , не хуже требуемой $S_{тр}$, то процесс заканчивается (бл.2).

В случае $S_1 > S_{тр}$ процесс продолжается и реализуется расширение словаря признаков. В частности, здесь реализован переход к растровым семантически сегментированным ТИ и ЭИ. Для их идентификации снова использована парная функция Джеккарда (10).

Данный иерархический подход является адаптивным к изменяемым условиям наблюдения наблюдаемых ТИ и ЭИ. При этом на каждом i -м цикле поиска (для определенных рабочих словарей признаков) область S_i ,

Преимуществами оценки сходства изображений на основе семантических описаний наблюдаемых сцен по сравнению с растровыми описаниями является возможность сопоставления признаков (классов объектов, отношений, атрибутов), без пространственной обработки и анализа растровой информации.

При этом, выделение признаков с помощью обученных нейросетей позволяет существенно сократить время обработки и анализа видеоинформации.

На рис. 5,а представлен пример наблюдаемой сцены, принятой в качестве ЭИ, и ее семантическое описание. ТИ и семантическое описание ТИ показаны на рис. 5,б.

Сформированное семантическое описание позволяет представлять наблюдаемые сцены в виде набора классов объектов, присутствующих в этой сцене. Так, текущее ТИ, представленное на рис. 5,б может быть описано в виде:

«Поверхность – вода – дорога» или «П – В – Д».

Для идентификации ТИ на ЭИ необходимо найти участки ЭИ, которые соответствуют этому описанию.

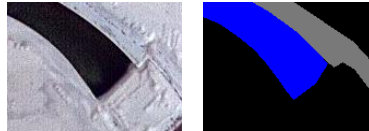
В данном описании не учитывались атрибуты объектов и отношения, требующие включения дополнительных процедур для выделения этих признаков.

На рис. 6 показаны результаты исследования семантического описания ЭИ при поиске участков, схожих по описанию ТИ.

Белым цветом на рисунке 6 отмечены области S_1 , соответствующие значению функции Джеккарда $K_D = 1$. Здесь семантические описания ТИ и ЭИ полностью совпадают. Координаты ТИ определяют координаты верхнего левого угла.



а – ЭИ и семантическое описание ЭИ



б – ТИ и семантическое описание ТИ

Рис. 5. Наблюдаемая сцена



Рис. 6. Визуализация функции Джекарда

Сплошное обследование семантического описания ЭИ с помощью функции Джекарда показало возможность существенного сокращения требуемого объема вычислений. Так, при сплошном поиске с использованием семантических описаний количество операций будет равно

$$K_{\Sigma D} = (M - n + 1)(N - n + 1)K_{fD}. \quad (11)$$

Следовательно, количество выполняемых элементарных операций уменьшилось в k -раз по сравнению с обработкой растровых изображений

$$k = \frac{mn(M - n + 1)(N - n + 1)K_o}{(M - n + 1)(N - n + 1)K_{fD}} = \frac{mnK_o}{K_{fD}}. \quad (12)$$

При выборочном сканировании ЭИ объем вычислений еще более сократится, т.к. количество обследуемых участков будет определяться плотностью расположения объектов (присутствующих на ТИ) на семантическом описании ЭИ.

В рассматриваемом примере $S_0/S_1 \approx 7$.

Для дальнейшего повышения точности идентификации, в соответствии с алгоритмом, представленном на рис. 4, следующий этап поиска (бл.3, 4) реализован в области S_1 с использованием семантически сегментированных ТИ и ЭИ. Сопоставление изображений производилось функцией Джекарда.

Результаты расчетов показаны на рис. 7.

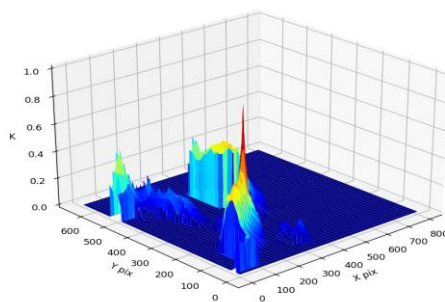


Рис. 7. Значения функции Джекарда в пространстве ЭИ

Идентификация ТИ проведена успешно и показало высокую точность оценки положения ТИ на ЭИ.

Однако необходимо отметить, что на этом этапе поиска сокращение вычислений было обеспечено только отношением количества реализуемых операций в корреляционных алгоритмах (K_0) и в функции Джекарда (K_{fD}).

$$k = \frac{mn(M-n+1)(N-n+1)K_0}{mn(M-n+1)(N-n+1)K_{fD}} = \frac{K_0}{K_{fD}}. \quad (13)$$

В целом, проведенные исследования показывают перспективность предложенного подхода.

Для оценки устойчивости семантических описаний наблюдаемых сцен предполагается проведение исследований, направленных на выявление ограничений к формированию семантических описаний, устойчивых к изменениям условий наблюдения.

Заключение. Предложен алгоритм решения задачи сравнения текущих и эталонных изображений на основе использования семантических описаний наблюдаемых сцен, позволяющий в ряде случаев заменить попиксельный анализ растровых изображений.

В работе приведены: общий алгоритм визуальной навигации, а также основные этапы методики формирования семантических описаний.

Предложены алгоритмы сравнения и идентификации семантических описаний ТИ и ЭИ по наличию классов объектов на основе функции Джекарда, а также иерархический алгоритм сравнения и идентификации изображений, основанный на последовательном применении семантических, и растровых описаний наблюдаемых сцен.

Показано, что использование процедуры сравнения семантических описаний ТИ и ЭИ по присутствующим классам объектов позволяет существенно сократить вычисления, необходимые для идентификации изображений.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования России, № темы FSFF-2024-0001.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Веремеенко К.К., Желтов С.Ю., Ким Н.В. и др. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Себрякова. – М.: Физматлит, 2009. – 556 с.
2. Али Б., Садеков Р.Н., Цодокова В.В. Алгоритмы навигации беспилотных летательных аппаратов с использованием систем технического зрения // Гироскопия и навигация. – 2022. – Т. 30, № 4 (119). – С. 87-105.
3. Красовский А.А., Белоглазов И.Н., Чигин Г.П. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем. – М.: Наука, 1979.
4. Баклицкий В.К., Бочкарев А.М., Мусьяков М.П. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации. – М.: Радио и связь, 1988.
5. Ким Н.В. Обработка и анализ изображений в системах технического зрения: учеб. пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 164 с.
6. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. – М.: Высшая школа, 1989. – 232 с.

7. Команда Лаборатории приборов, 2021, Оценка ошибки вычисления навигации инерциальными модулями. – <https://mp-lab.ru/navigation-error-estimation/?ysclid=lyg5vzaxqg875561868> (21 August 2024).
8. Pazychev D., Sadekov R. Simulation of INS Errors of Various Accuracy Classes. – 2020. – 1-3. – <https://doi.org/10.23919/ICINS43215.2020.9133869>.
9. Семантическая сегментация изображений с использованием видимого и ближнего инфракрасного каналов. – URL: <https://habr.com/ru/articles/723646/> (дата обращения: 17.10.2024).
10. Vijay Badrinarayanan, Alex Kendall. SegNet: A Deep Convolutional EncoderDecoder Architecture for Image Segmentation. – 2016. – С. 14.
11. Liang-Chieh Chen, George Papandreou. DeepLab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs. – 2017. – С. 14.
12. Shotton J., Winn J., Rother C., and Criminisi A. Textonboost for image understanding: Multi-class object recognition and segmentation by jointly modeling texture, layout, and context // IJCV. – 2009.
13. Shotton J., Johnson M., and Cipolla R. Semantic texton forests for image categorization and segmentation // in CVPR. – 2008.
14. Fulkerson B., Vedaldi A., and Soatto S. Class segmentation and object localization with superpixel neighborhoods // in ICCV. – 2009.
15. Старовойтов В.В., Голуб Ю.И. Об оценке результатов классификации несбалансированных данных по матрице ошибок // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 1. – С. 61-71.
16. Лукашик Д.В. Анализ современных методов сегментации изображений // Экономика и качество систем связи. – 2022. – № 2.
17. Zhongzhi Shi. Intelligence Science. Leading the Age of Intelligence. – Tsinghua University Press, 2021. – <https://doi.org/10.1016/C2020-0-02066-9>.
18. Коновалов К.Д. Алгоритм планирования маршрута БПЛА в условиях недостатка визуальных ориентиров // Системы анализа и обработки данных. – 2024. – № 2 (94). – С. 37-54.
19. Zheng G., Jiang Z., Zhang H., Yao X. Deep semantic segmentation of unmanned aerial vehicle remote sensing images based on fully convolutional neural network // Frontiers in Earth Science. – 2023. – 11. – P. 12.
20. Pratap Singh K., Salvador J., Weihs L., Kembhavi A. Scene Graph Contrastive Learning for Embodied Navigation // IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2023. – P. 10884-10894.

REFERENCES

1. Veremeenko K.K., Zheltov S.Yu., Kim N.V. i dr. Sovremennye informatsionnye tekhnologii v zadachakh navigatsii i navedeniya bespilotnykh manevrennykh letatel'nykh apparatov [Modern information technologies in the problems of navigation and guidance of unmanned maneuverable aerial vehicles], pod red. M.N. Krasil'shchikova, G.G. Sebyakova. Moscow: Fizmatlit, 2009, 556 p.
2. Ali B., Sadekov R.N., Tsodokova V.V. Algoritmy navigatsii bespilotnykh letatel'nykh apparatov s ispol'zovaniem sistem tekhnicheskogo zreniya [Navigation algorithms for unmanned aerial vehicles using machine vision systems], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and Navigation], 2022, Vol. 30, No. 4 (119), pp. 87-105.
3. Krasovskiy A.A., Beloglazov I.N., Chigin G.P. Teoriya korrelyatsionno-ekstremal'nykh navigatsionnykh sistem [Theory of correlation-extreme navigation systems]. Moscow: Nauka, 1979.
4. Baklitskiy V.K., Bochkarev A.M., Mus'yakov M.P. Metody fil'tratsii signalov v korrelyatsionno-ekstremal'nykh sistemakh navigatsii [Methods of signal filtration in correlation-extreme navigation systems]. Moscow: Radio i svyaz', 1988.
5. Kim N.V. Obrabotka i analiz izobrazheniy v sistemakh tekhnicheskogo zreniya: ucheb. posobie [Image processing and analysis in machine vision systems: a tutorial]. Moscow: Izd-vo MAI, 2001, 164 p.
6. Gorelik A.L., Skripkin V.A. Metody raspoznavaniya [Recognition methods]. Moscow: Vysshaya shkola, 1989, 232 p.
7. Komanda Laboratorii priborov, 2021, Otsenka oshibki vychisleniya navigatsii inertial'nykh modulyami [Instrument Laboratory Team, 2021, Estimation of the error in calculating navigation using inertial modules]. Available at: <https://mp-lab.ru/navigation-error-estimation/?ysclid=lyg5vzaxqg875561868> (accessed 21 August 2024).
8. Pazychev D., Sadekov R. Simulation of INS Errors of Various Accuracy Classes, 2020, 1-3. Available at: <https://doi.org/10.23919/ICINS43215.2020.9133869>.
9. Semanticheskaya segmentatsiya izobrazheniy s ispol'zovaniem vidimogo i blizhnego infrakrasnogo kanalov [Semantic segmentation of images using visible and near infrared channels]. Available at: <https://habr.com/ru/articles/723646/> (accessed 17 October 2024).

10. Vijay Badrinarayanan, Alex Kendall. SegNet: A Deep Convolutional EncoderDecoder Architecture for Image Segmentation, 2016, pp. 14.
11. Liang-Chieh Chen, George Papandreou. DeepLab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs, 2017, pp. 14.
12. Shotton J., Winn J., Rother C., and Criminisi A. Textonboost for image understanding: Multi-class object recognition and segmentation by jointly modeling texture, layout, and context, *IJCV*, 2009.
13. Shotton J., Johnson M., and Cipolla R. Semantic texton forests for image categorization and segmentation, in *CVPR*, 2008.
14. Fulkerson B., Vedaldi A., and Soatto S. Class segmentation and object localization with superpixel neighborhoods, in *ICCV*, 2009.
15. Starovoytov V.V., Golub Yu.I. Ob otsenke rezul'tatov klassifikatsii nesbalansirovannykh dannykh po matritse oshibok [On the assessment of the results of classification of unbalanced data by the error matrix], *Informatika* [Informatics], 2021, Vol. 18, No. 1, pp. 61-71.
16. Lukashik D.V. Analiz sovremennykh metodov segmentatsii izobrazheniy [Analysis of modern methods of image segmentation], *Ekonomika i kachestvo sistem svyazi* [Economics and quality of communication systems], 2022, No. 2.
17. Zhongzhi Shi. Intelligence Science. Leading the Age of Intelligence. Tsinghua University Press, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/C2020-0-02066-9>.
18. Konovalov K.D. Algoritm planirovaniya marshruta BPLA v usloviyakh nedostatka vizual'nykh orientirov [Algorithm for planning a UAV route under conditions of insufficient visual reference points], *Sistemy analiza i obrabotki dannykh* [Data Analysis and Processing Systems], 2024, No. 2 (94), pp. 37-54.
19. Zheng G., Jiang Z., Zhang H., Yao X. Deep semantic segmentation of unmanned aerial vehicle remote sensing images based on fully convolutional neural network, *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11, pp. 12.
20. Pratap Singh K., Salvador J., Weihs L., Kembhavi A. Scene Graph Contrastive Learning for Embodied Navigation, *IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2023, pp. 10884-10894.

Ким Николай Владимирович – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: Nkim2011@list.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89037208924; к.т.н.; профессор кафедры 704 «Информационно-управляющие комплексы ЛА».

Удалова Наталия Владимировна – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: vice1dean7@mai.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89197724814; к.т.н.; доцент кафедры 704 «Информационно-управляющие комплексы ЛА».

Бодунков Николай Евгеньевич – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: bodunkov63@hotmail.com; г. Москва, Россия; тел.: 89168126007; к.т.н.; доцент кафедры 704 «Информационно-управляющие комплексы ЛА».

Гиренко Дмитрий Сергеевич – ООО "МИРП-ИС"; e-mail: dima@webiceberg.com; г. Дубна, Россия; инженер.

Ляпин Никита Александрович – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: lyapin2010@yandex.ru; г. Москва; тел.: 89164399972; к.т.н.; доцент кафедры 704 «Информационно-управляющие комплексы ЛА».

Kim Nikolay Vladimirovich – Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: Nkim2011@list.ru; Moscow, Russia; phone: +79037208924; cand. of eng. sc.; professor of Department 704 "Aircraft Information and Control Complexes".

Udalova Natalia Vladimirovna – Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: vice1dean7@mai.ru; Moscow, Russia; phone: +79197724814; cand. of eng. sc.; associate professor of Department 704 "Aircraft Information and Control Complexes".

Bodunkov Nikolay Evgen'evich – Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: bodunkov63@hotmail.com; Moscow, Russia; phone: +79168126007; cand. of eng. sc.; associate professor of Department 704 "Aircraft Information and Control Complexes".

Girenko Dmitry Sergeevich – MIRP-IS LLC; e-mail: dima@webiceberg.com; Dubna, Russia; engineer.

Lyapin Nikita Alexandrovich – Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: lyapin2010@yandex.ru; phone: +79164399972; cand. of eng. sc.; associate professor of Department 704 "Aircraft Information and Control Complexes".

С.В. Кулешов, А.В. Кваснов, А.А. Зайцева, А.Л. Ронжин**КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ
ПО ЕСТЕСТВЕННЫМ ОРИЕНТИРАМ ДЛЯ БПЛА, РАБОТАЮЩИХ
В УСЛОВИЯХ НЕДОСТУПНОСТИ ГНСС**

Целью исследования является обеспечение возможности навигации БПЛА при невозможности применения спутниковых средств глобального позиционирования с использованием ГНСС в условиях РЭБ. Для достижения поставленной цели предлагается комплексный подход к обеспечению навигации БПЛА по визуальным ориентирам с использованием систем технического зрения. Предлагается синтез изображений подстилающей поверхности за счет комплексирования данных сенсоров, повышающий качество позиционирования БПЛА при условии отсутствия спутниковых навигационных систем. Показано, что при совмещении изображений дистанционного зондирования, имеющих различную природу происхождения и изменяющиеся внешние условия эксплуатации (день-ночь, зима-лето и т.д.), важно наиболее полно локализовать объекты подстилающей поверхности. В системе технического зрения для визуальной навигации БПЛА по естественным ориентирам предложен метод электромеханической развертки изображения, позволяющий увеличить поле зрения камеры произвольного диапазона. Проведено моделирование характеристик системы технического зрения с электромеханической разверткой для определения границ применимости к задаче визуальной навигации. Показано, что наиболее значимым параметром точности позиционирования является высота съемки подстилающей поверхности, которая квазилинейна при условии фиксированного угла наклона камеры, а для качественного позиционирования наилучшим вариантом является фронтальное положение камеры в точке надира. Предложенный подход позволяет создавать виртуальные 3D-модели подстилающей поверхности, тем самым увеличивая возможности по более точному распознаванию объектов на основе масштаба и размеров сегментируемых областей. Измерение угла места камеры может быть использовано для обнаружения и распознавания естественных ориентиров, которые могут быть заранее определены (точки пересечения дорог, здания или сооружения, объекты коммуникаций и т.д.). С другой стороны, фронтальное положение камеры с нулевым углом места выгодно для сверки маршрута полета, позиционируя положение БПЛА относительно опорного ориентира. Это обусловлено тем, что с широким использованием программного обеспечения, основанного на математических моделях, технологию фотограмметрической линейки стало целесообразно применять для количественного измерения планов местности и карт.

БПЛА; визуальная навигация; комплексирование данных; техническое зрение.

S.V. Kuleshov, A.V. Kvasnov, A.A. Zaytseva, A.L. Ronzhin**MULTIPURPOSE APPROACH TO VISUAL NAVIGATION BASED ON
LANDSCAPES FOR UAVS OPERATING IN GNSS-UNAVAILABLE CONDITIONS**

The aim of the study is to provide the possibility of UAV navigation when it is impossible to use satellite global positioning systems using GNSS in electronic warfare conditions. To achieve this goal, a comprehensive approach to ensuring UAV navigation by visual landmarks using machine vision systems is proposed. It is proposed to synthesize images of the underlying surface by combining sensor data, which improves the quality of UAV positioning in the absence of satellite navigation systems. It is shown that when combining remote sensing images of different origin and changing external operating conditions (day-night, winter-summer, etc.), it is important to most fully localize the objects of the underlying surface. In the machine vision system for visual navigation of UAVs by natural landmarks, a method of electromechanical image scanning is proposed, which allows increasing the field of view of a camera of an arbitrary range. Modeling of the characteristics of the machine vision system with electromechanical scanning is carried out to determine the limits of applicability to the problem of visual navigation. It is shown that the most significant parameter of positioning accuracy is the shooting height of the underlying surface, which is quasi-linear under the condition of a fixed camera tilt angle, and for high-quality positioning, the best option is the frontal position of the camera at the nadir point. The proposed approach allows creating virtual 3D models of the underlying surface, thereby increasing the capabilities for more accurate recognition of objects based on the scale and size of the segmented areas. Measuring the camera elevation angle can be used to detect and recognize natural landmarks that can be predetermined (road intersections,

buildings or structures, utility facilities, etc.). On the other hand, the frontal position of the camera with a zero elevation angle is advantageous for verifying the flight route, positioning the UAV relative to the reference landmark. This is due to the fact that with the widespread use of software based on mathematical models, the photogrammetric ruler technology has become appropriate for quantitative measurement of terrain plans and maps.

UAV; visual navigation; data complexing; computer vision.

Введение. Характерной тенденцией современных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и беспилотных авиационных комплексов (БАК) становится повышение автономности их функционирования. Это, в свою очередь, требует использования навигационных средств, позволяющих принимать решения об управлении полетом и выполнения целевых задач только бортовыми средствами без организации канала передачи данных с наземной станцией управления. Отдельным вариантом применения навигационных средств является режим «радиомолчания», когда используются только пассивные средства определения пространственного местоположения БПЛА без излучения физических полей.

Последние годы показали, что широко используемые спутниковые средства глобального позиционирования с использованием ГНСС в условиях применения РЭБ становятся неэффективными и бесполезными. Эффекты применения РЭБ могут проявляться как снижение точности позиционирования, невозможность позиционирования, искажение позиционирования (ложное позиционирование) [1–5]. В частности, в работе [6] проводится моделирование, при котором позиция объекта начинает двигаться по круговой траектории вокруг некоторого центра (рис. 1). Даже в случае успешного обнаружения факта атаки далеко не всегда удастся корректно определить реальные координаты объекта на основе сигнала, принимаемого ГНСС приемником.

Таким образом, в настоящее время особую актуальность приобретают исследования, направленные на решение задачи определения пространственного положения БПЛА без использования ГНСС, определение их возможностей, теоретических и эксплуатационных ограничений.

В авиационных навигационных системах известны подходы комплексирования данных от различных источников для повышения точности определения местоположения, в том числе с использованием данных визуальной навигации [7–9]

Существуют подходы к повышению точности инерциальной навигационной системы летательного аппарата в условиях отсутствия высокоточных дополнительных датчиков информации, например GPS за счет комплексирования [10].

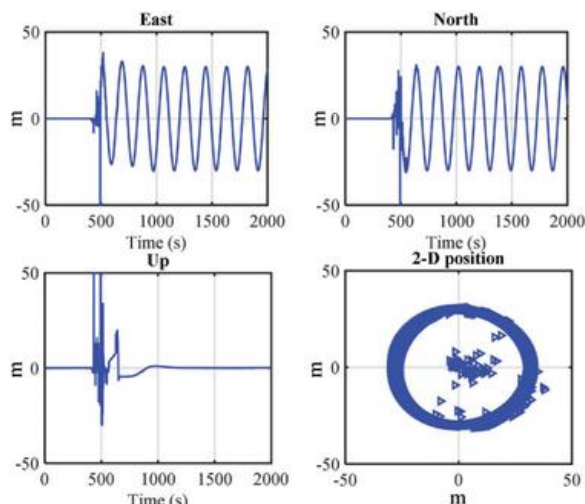


Рис. 1. Результат моделирования спуфинговой атаки на сигнал ГНСС из работы [6]

Принимая во внимание технические ограничения существующих датчиков, для успешной навигации БПЛА актуальны процедуры по совмещению разнородной информации, получаемой от аппаратных сенсоров. Эти процедуры могут включать:

- ♦ выделение, распознавание и отождествление точек привязки – объектов местности и инфраструктуры на изображениях различного спектрального диапазона (видимый, инфракрасный, режим синтезированной апертуры (РСА));
- ♦ обнаружение неподвижных радиоконтрастных объектов радарными непрерывного действия или лидарами, работающими на заданных объектных ориентирах.

Варианты комплексирования данных для навигации в условиях отсутствия ГНСС. Стратегия определения положения БПЛА на местности может быть 2 типов в зависимости от априорных знаний:

- 1) локализация в условиях априорной неопределенности (положение БПЛА известно с точностью до района полетов) – в этом случае производится поиск фрагмента изображения с датчиков БПЛА с картой местности всего района;
- 2) локализация в условиях априорного знания о местоположении, когда в процессе выполнения полета производится сличение изображений с датчиков БПЛА с фрагментами карты, где БПЛА находился в предыдущий момент времени с целью уточнения текущего местоположения.

В первом случае, система навигации БПЛА опирается на визуальные датчики (камеры видимого и инфракрасного диапазонов, режим РСА), с помощью которых навигационная система фиксирует подстилающую поверхность с заданной периодичностью. Далее с помощью системы технического зрения обнаруживаются характерные объекты местности, используемые для совмещения снимка с картой местности. Совмещенные данные позволяют корректировать данные о месте (пространственном положении), а также траекторию полета БПЛА (рис. 2).

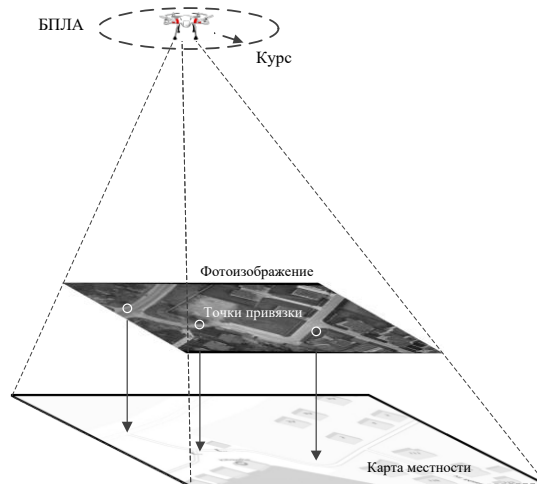


Рис. 2. Иллюстрация технологии синтеза изображений и карты местности с целью определения пространственного положения БПЛА

При совмещении изображений дистанционного зондирования, имеющих различную природу происхождения (оптический диапазон + РСА, ИК диапазон + оптический диапазон, данные дистанционного зондирования земли – аэрофотоснимки, картографическое изображение) и условия эксплуатации (день-ночь, зима-лето и т.д.), важно наиболее полно отразить все возможные объекты подстилающей поверхности. В литературе достаточно широко рассмотрены технологии и методы совмещения/комплексирования изображений:

- ♦ метод взаимной корреляции [11];

- ♦ согласование спектральных точек (Spectral point matching - SPM) (в то числе на основе диаграммы Вороного) [12, 13];
- ♦ масштабно-инвариантное преобразование объектов (scale-invariant feature transform – SIFT) [13, 14];
- ♦ использование структурных дескрипторов [14, 15];
- ♦ на основе адаптация к предметной области – (Domain adaptation), в том числе использование различных метрики – Евклида, Хаусдорфа и т.д. [16, 17].

Модель расширения поля зрения камеры произвольного диапазона. Прямое повышение характеристик бортовых систем технического зрения ограничивается массогабаритными факторами аппаратуры и ее энергоэффективностью. Для оптических средств, помимо обозначенных факторов, существенно важно наличие высокого разрешения видеокамеры и широкое поле зрения.

К сожалению, применение широкоугольных камер (так называемый «рыбий глаз») приводит к естественным эффектам оптической аберрации, когда возникают нелинейные искажения относительно фокусной оси этой камеры. В области инфракрасного диапазона к этому явлению также добавляются технологические трудности производства подобных устройств, из-за чего стоимость и масса аппаратуры существенно возрастает.

В качестве варианта решения подобной проблемы при проектировании бортовых камер для решения навигационных задач можно предложить, электромеханическое сканирование подстилающей поверхности (рис. 3).

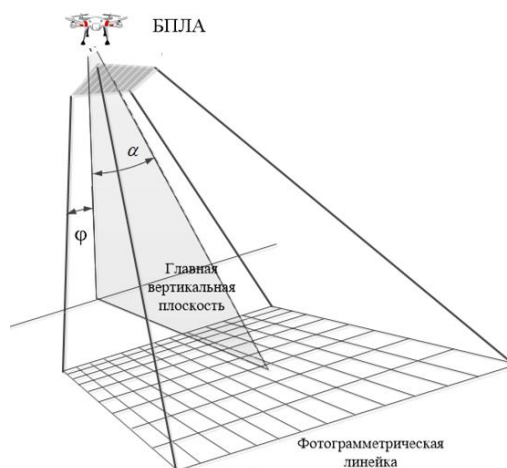


Рис. 3. Оценка изображения подстилающей поверхности с помощью фотограмметрической линейки

Цель электромеханического сканирования – преодоление трудностей, возникающих в ситуации, когда БПЛА преодолевает участки «однородной» местности, не имеющей естественных ориентиров (например, густой лес, или широкая водная поверхность). В этом случае возможно применение технологий так называемой фотограмметрической линейки, то есть оценка координат подстилающей поверхности на основе теории геометрической оптики [18, 19].

В общем случае, решение задачи об определении координаты точки местности основано на системе уравнений [20, 21]:

$$\begin{cases} X - X_s = (Z - Z_s) \frac{a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f}, \\ Y - Y_s = (Z - Z_s) \frac{b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f} \end{cases}$$

где x_0 и y_0 – начальное положение систем координат снимка БПЛА относительно некоторой фиксированной точки о пространства; X и Y – координаты точки на снимке относительно начала координат $Ox_s Y_s Z_s$; f – фокусное расстояние; $a; b; c_i$ – направляющие косинусы, зависящие от углов внешнего ориентирования.

Для случая, когда камера БПЛА совершает повороты только вокруг поперечной оси БПЛА (угол тангажа – α), тогда представленная система уравнений преобразуются к следующему виду:

$$X = H \frac{x}{f \cos(\alpha) - y \sin(\alpha)}; \quad Y = H \frac{f \sin(\alpha) + y \cos(\alpha)}{f \cos(\alpha) - y \sin(\alpha)}.$$

Начало отсчета в системе координат снимка совпадает с центром фотоизображения, а координаты точек местности X и Y отсчитываются относительно точки надир, полученного в результате опущенного перпендикуляра из точки БПЛА на поверхность Земли. При значениях угла $\alpha = 0 \dots 50$ градусов величина вертикального разрешения естественным образом сокращается (рис. 4)

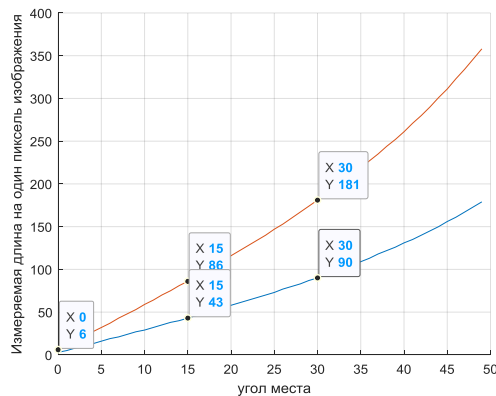


Рис.4. Зависимость потенциальной точности определения места по подстилающей поверхности в зависимости от угла места: красная кривая – высота БПЛА 300 м, синяя кривая – высота БПЛА 150 м

При $\alpha = 0$, т.е. для камеры, выставленной в надир (вертикально вниз), разрешение каждой точки поверхности обратно пропорционально значению фокусного расстояния f согласно системе уравнений $Y = H (y/f)$. Таким образом, точность обнаружения и идентификации естественных ориентиров зависит от разрешения камеры и ее фокусного расстояния (рис. 5).



Рис. 5. Фотограмметрическая линейка для случая съемки в надир в видимом диапазоне с высоты 150 м

В случае вертикального отклонения камеры, точность измерений подстилающей поверхности нелинейно сокращается (рис. 4), что приводит к проективным искажениям, не позволяющим должным образом оценивать естественные ориентиры на местности (рис. 6).

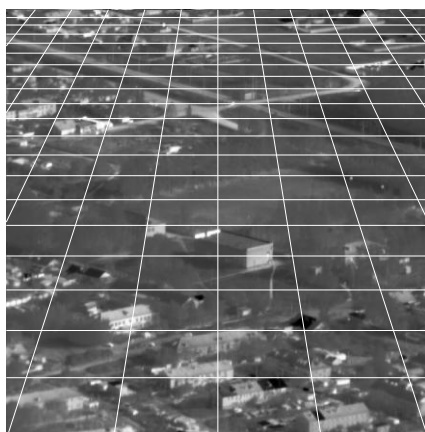


Рис. 6. Фотограмметрическая линейка для случая наклонной съемки ($\alpha = 550$) в инфракрасном диапазоне с высоты 300 м

Можно сделать определённый вывод, что при сравнительно небольших углах отклонения камеры (в интервале $15...20^\circ$) на высоте полета БПЛА 150...300 м возможно применение технологии сегментированного распознавания объектов, используемых как естественные ориентиры для визуальной навигации.

Потеря точности относительно увеличения угла наклона камеры преимущественно происходит вдоль вертикальной оси. Это обусловлено математической формализацией задачи проективной геометрии, описывающей технологию фотограмметрии подстилающей поверхности, а также влиянием крутизны Земли. Для более наглядной интерпретации полученных результатов (рис. 5, 6) оценка погрешностей приведена в сводных таблицах, где учитывается различная высота полета и разное разрешение камеры, осуществляющей мониторинг подстилающей поверхности (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Точность определения расстояния на подстилающей поверхности в зависимости от угла места при высоте съемки 150 м и переменных параметрах фокусного расстояния и количества пикселей вдоль вертикальной оси камеры

Угол наклона камеры в вертикальной оси	Фокусное расстояние $r_{\text{камеры}} = 0.05 \text{ м}$		Фокусное расстояние $r_{\text{камеры}} = 0.2 \text{ м}$	
	Разрешение изображения вдоль вертикальной оси		Разрешение изображения вдоль вертикальной оси	
	$Q_{\text{пикселей}} = 512$	$Q_{\text{пикселей}} = 1080$	$Q_{\text{пикселей}} = 512$	$Q_{\text{пикселей}} = 1080$
0°	1	<1	<1	<1
10°	27	27	27	27
20°	55	55	55	55
30°	88	87	87	87
40°	127	127	126	126
50°	181	180	179	179

Таблица 2

Таблица точности определения расстояния на подстилающей поверхности в зависимости от угла места при высоте съемки 300м и переменных параметрах фокусного расстояния и количества пикселей вдоль вертикальной оси камеры

Угол наклона камеры в вертикальной оси	Фокусное расстояние $r_{\text{камеры}} = 0.05$		Фокусное расстояние $r_{\text{камеры}} = 0.2$	
	Разрешение изображения вдоль вертикальной оси		Разрешение изображения вдоль вертикальной оси	
	$Q_{\text{пикселей}} = 512$	$Q_{\text{пикселей}} = 1080$	$Q_{\text{пикселей}} = 512$	$Q_{\text{пикселей}} = 1080$
0°	2	1	<1	<1
10°	55	54	53	53
20°	111	110	110	109
30°	175	174	174	173
40°	254	253	252	252
50°	361	359	358	358

Сравнительный анализ показывает, что наиболее значимым параметром точности позиционирования является высота съемки подстилающей поверхности, которая квазилинейна при условии фиксированного угла наклона камеры. Влияние разрешения камеры и переменного фокусного расстояния минимально. Рассчитанные величины актуальны в случае применения технологии одометрии, когда необходимо осуществлять навигацию по естественным ориентирам. Очевидно, что для качественного позиционирования наилучшим вариантом является фронтальное положение камеры в точке надира (рис. 7).

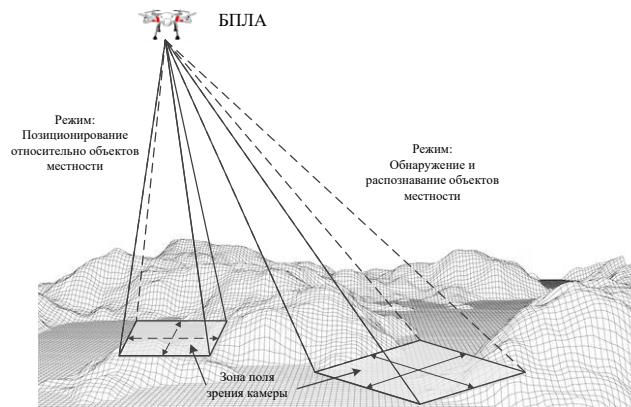


Рис. 7. Положение камеры БПЛА относительно зоны сканирования для основных режимов работы

Учитывая тот факт, что максимальное поле зрения большинства камер как видимого, так и инфракрасного диапазонов вдоль главного вертикала (то есть вдоль угла места) колеблется в пределах 35...45°, то на высоте 150-300м на краях снимка точность измерений может достигать 150-250 метров/пиксель. Очевидно, что для фронтального положения камеры следует ограничиваться 0...5°, где погрешность не будет превышать величины 20-25 метров/пиксель.

Заключение. Предложенный подход позволяет создавать виртуальные 3D-модели подстилающей поверхности, тем самым увеличивая возможности по более точному распознаванию объектов на основе масштаба и размеров сегментируемых областей. Измерение угла места камеры может быть использовано для обнаружения и распознавания естественных ориентиров, которые могут быть заранее определены (точки пересечения до-

рог, здания или сооружения, объекты коммуникаций и т.д.). С другой стороны, фронтальное положение камеры с нулевым углом места выгодно для сверки маршрута полета, позиционируя положение БПЛА относительно опорного ориентира. Это обусловлено тем, что с широким использованием программного обеспечения, основанного на математических моделях, технологию фотограмметрической линейки стало целесообразно применять для количественного измерения планов местности и карт.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Jafarnia-Jahromi, Ali & Broumandan, Ali & Nielsen, J. & Lachapelle, Gérard*. GPS Vulnerability to Spoofing Threats and a Review of Antispoofing Techniques // *International Journal of Navigation and Observation*. – 2012. – 10.1155/2012/127072.
2. *Пантенков Д.Г., Литвиненко В.П., Глушков А.Н.* Основные проблемные вопросы и современные подходы к противодействию малоразмерным разведывательно-ударным беспилотным летательным аппаратам // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. – 2023. – Т. 19, № 4. – С. 77-88. – DOI: 10.36622/VSTU.2023.19.4.010.
3. *Савин И.В.* GPS-спуфинг как актуальная угроза системе позиционирования GPS // *Наука сегодня: история и современность: Матер. международной научно-практической конференции, Вологда, 25 октября 2017 года*. Т. 1. – Вологда: ООО «Маркер», 2017. – С. 68-70.
4. *Кривенков Д.В.* GPS - спуфинг принцип работы, его воздействие и слабые места // *Технические и математические науки. Студенческий научный форум: Электронный сборник статей по материалам V студенческой международной научно-практической конференции*. Т. 5 (5): Общество с ограниченной ответственностью "Международный центр науки и образования", 2018. – С. 37-43. – EDN LXMAXZ.
5. *Басан Е.С., Абрамов Е.С., Басюк А.Г., Сушкин Н.А.* Метод обнаружения атак на систему навигации БПЛА // *Информатика и автоматизация*. – 2021. – Т. 20, № 6. – С. 1368-1394. – DOI: 10.15622/ia.20.6.7.
6. *Nobody's Fool. Spoofing Detection in a High-Precision Receiver* // *Inside GNSS*. – July/August 2020. – Свободный режим доступа: <https://insidegnss.com/nobodys-fool-spoofing-detection-in-a-high-precision-receiver> (дата обращения: 15.02.2025).
7. *Труфанов М.И., Панищев В.С., Фролов М.М.* Система технического зрения с множественными источниками изображений // *Информационные технологии и математическое моделирование систем 2020: Труды международной научно-технической конференции, Одинцово, Московская область, 16–19 ноября 2020 года*. – Одинцово, Московская область: ЦИТП РАН, 2020. – С. 124-126. – DOI: 10.36581/CITP.2020.11.84.027.
8. *Замыслов М.А., Мальцев А.М., Михайленко С.Б., Штанькова Н.В.* Способ вывода летательного аппарата в точку начала посадки при отказе (отсутствии) бортового или наземного оборудования радиотехнической системы ближней навигации // *Проблемы безопасности полетов*. – 2019. – № 11. – С. 14-21. – DOI: 10.36535/0235-5000-2019-11-2.
9. *Ma X., Liu X., Li C.-L., Che S.* Multi-source information fusion based on factor graph in autonomous underwater vehicles navigation systems // *Assembly Automation*. – 2021. – Vol. 41, No. 5. – P. 536-545. – DOI: 10.1108/AA-10-2020-0155.
10. *Неусытин К.А., Пролетарский А.В., Селезнева М.С.* Алгоритмы комплексирования инерциальной навигационной системы с датчиками угловых ускорений // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2023. – 24 (2). – P. 107-112. – DOI: 10.17587/mau.24.107-112.
11. *Yingbing Liu, Yingcheng Zhou, Yongsheng Zhou, Lixiang Ma, Bingnan Wang, Fan Zhang*. Accelerating SAR Image Registration Using Swarm-Intelligent GPU Parallelization // *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*. – 2020. – Vol. 13. – P. 5694-5703.
12. *Haigang Sui, Chuan Xu, Junyi Liu, and Feng Hua*. Automatic Optical-to-SAR Image Registration by Iterative Line Extraction and Voronoi Integrated Spectral Point Matching // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. – November 2015. – Vol. 53, No. 11. – P. 6058-6072.
13. *Guoping Zhang, Haigang Sui, Zhina Song, Feng Hua, Li Hua*. Automatic Registration Method of SAR and Optical Image Based on Line Features and Spectral Graph Theory // *2nd International Conference on Multimedia and Image Processing*. – 2017. – P. 64-67.
14. *Bin Fan, Chunlei Huo, Chunhong Pan, Qingqun Kong*. Registration of Optical and SAR Satellite Images by Exploring the Spatial Relationship of the Improved SIFT // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. – July 2013. – Vol. 10, No. 4. – P. 657-661.
15. *Qiuzhe Yu, Dawen Ni, Yuxuan Jiang, Yuxuan Yan, Jiachun An, Tao Sun*. Universal SAR and optical image registration via a novel SIFT framework based on nonlinear diffusion and a polar spatial-frequency descriptor // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 171. – P. 1-17.
16. *Sourabh Paul, Umesh C. Pati*. Automatic optical-to-SAR image registration using a structural descriptor // *IET Image Processing*. – November 2019. – Vol. 14, No. 1. – P. 62-73.

17. Zhaoxiang Zhang, Yuelei Xu, Qi Cui, Qing Zhou, Linhua Ma. Unsupervised SAR and Optical Image Matching Using Siamese Domain Adaptation // IEEE Transaction on geoscience and remote sensing. – May 2022. – Vol. 60.
18. Skolnik M. I. Radar handbook. – 3rd ed. – New-York: The McGraw-Hill Companies, 1327 p.
19. El-Darymli K., Gill E.W., Mcguire P., Power D. and Moloney C. Automatic Target Recognition in Synthetic Aperture Radar Imagery: A State-of-the-Art Review // IEEE Access. – 2016. – Vol. 4. – P. 6014-6058.
20. Костров В.В., Толстов Е.Ф. Проблемы дистанционного зондирования Земли с использованием космических РСА высокого разрешения // VII Всероссийские Армандовские чтения: молодая школа. Муром 27–29 июня 2017 года. – С. 76-113.
21. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. – 2nd ed. – Springer Series in Statistics, 2009. – 739 p.

REFERENCES

1. Jafarnia-Jahromi, Ali & Broumandan, Ali & Nielsen, J. & Lachapelle, Gérard. GPS Vulnerability to Spoofing Threats and a Review of Antispoofing Techniques, *International Journal of Navigation and Observation*, 2012. 10.1155/2012/127072.
2. Pantenkov D.G., Litvinenko V.P., Glushkov A.N. Osnovnye problemnye voprosy i sovremennye podkhody k protivodeystviyu malorazmernym razvedyvatel'no-udarnym bespilotnym letatel'nym apparatam [Main problematic issues and modern approaches to countering small-sized reconnaissance and strike unmanned aerial vehicles], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Voronezh State Technical University], 2023, Vol. 19, No. 4, pp. 77-88. DOI: 10.36622/VSTU.2023.19.4.010.
3. Savin I.V. GPS-spufig kak aktual'naya ugroza sisteme pozitsionirovaniya GPS [GPS spoofing as a current threat to the GPS positioning system], *Nauka segodnya: istoriya i sovremennost': Mater. mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Vologda, 25 oktyabrya 2017 goda* [Science today: history and modernity: Proceedings of the international scientific and practical conference, Vologda, October 25, 2017]. Vol. 1. Vologda: ООО «Marker», 2017, pp. 68-70.
4. Krivenkov D.V. GPS - spufig printsip raboty, ego vozdeystvie i slabye mesta [GPS - spoofing principle of operation, its impact and weaknesses], *Tekhnicheskie i matematicheskie nauki. Studencheskiy nauchnyy forum: Elektronnyy sbornik statey po materialam V studencheskoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. T. 5 (5): Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Mezhdunarodnyy tsentr nauki i obrazovaniya"*, 2018 [Technical and mathematical sciences. Student scientific forum: Electronic collection of articles based on the materials of the V student international scientific and practical conference. Vol. 5 (5): Limited Liability Company "International Center for Science and Education", 2018], pp. 37-43. EDN LXMAXZ.
5. Basan E.S., Abramov E.S., Basyuk A.G., Sushkin N.A. Metod obnaruzheniya atak na sistemu navigatsii BPLA [Method for detecting attacks on the UAV navigation system], *Informatika i avtomatizatsiya* [Computer Science and Automation], 2021, Vol. 20, No. 6, pp. 1368-1394. DOI: 10.15622/ia.20.6.7.
6. Nobody's Fool. Spoofing Detection in a High-Precision Receiver, *Inside GNSS*. July/August 2020. – Available at: <https://insidengss.com/nobodys-fool-spoofing-detection-in-a-high-precision-receiver> (accessed 15 February 2025).
7. Trufanov M.I., Panishchev V.S., Frolov M.M. Sistema tekhnicheskogo zreniya s mnozhestvennymi istochnikami izobrazheniy [Machine vision system with multiple image sources], *Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie sistem 2020: Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Odintsovo, Moskovskaya oblast', 16–19 noyabrya 2020 goda* [Information technologies and mathematical modeling of systems 2020: Proceedings of the international scientific and technical conference, Odintsovo, Moscow region, November 16-19, 2020]. Odintsovo, Moskovskaya oblast': TSITP RAN, 2020, pp. 124-126. DOI: 10.36581/CITP.2020.11.84.027.
8. Zamyaslov M.A., Mal'tsev A.M., Mikhaylenko S.B., Shtan'kova N.V. Sposob vyvoda letatel'nogo apparata v točku nachala posadki pri otkaze (otsutstvii) bortovogo ili nazemnogo oborudovaniya radiotekhnicheskoy sistemy blizhney navigatsii [Method for bringing an aircraft to the landing start point in case of failure (absence) of on-board or ground equipment of the short-range radio navigation system], *Problemy bezopasnosti poletov* [Flight safety issues], 2019, No. 11, pp. 14-21. DOI: 10.36535/0235-5000-2019-11-2.
9. Ma X., Liu X., Li C.-L., Che S. Multi-source information fusion based on factor graph in autonomous underwater vehicles navigation systems, *Assembly Automation*, 2021, Vol. 41, No. 5, pp. 536-545. DOI: 10.1108/AA-10-2020-0155.
10. Neusypin K.A., Proletarskiy A.V., Selezneva M.S. Algoritmy kompleksirovaniya inertsiyal'noy navigatsionnoy sistemy s datchikami uglovykh uskoreniy [Algorithms for integrating an inertial navigation system with angular acceleration sensors], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2023, 24 (2), pp. 107-112. DOI: 10.17587/mau.24.107-112.

11. Yingbing Liu, Yingcheng Zhou, Yongsheng Zhou, Lixiang Ma, Bingnan Wang, Fan Zhang. Accelerating SAR Image Registration Using Swarm-Intelligent GPU Parallelization, *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 2020, Vol. 13, pp. 5694-5703.
12. Haigang Sui, Chuan Xu, Junyi Liu, and Feng Hua. Automatic Optical-to-SAR Image Registration by Iterative Line Extraction and Voronoi Integrated Spectral Point Matching, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, November 2015, Vol. 53, No. 11, pp. 6058-6072.
13. Guoping Zhang, Haigang Sui, Zhina Song, Feng Hua, Li Hua. Automatic Registration Method of SAR and Optical Image Based on Line Features and Spectral Graph Theory, *2nd International Conference on Multimedia and Image Processing*, 2017, pp. 64-67.
14. Bin Fan, Chunlei Huo, Chunhong Pan, Qingqun Kong. Registration of Optical and SAR Satellite Images by Exploring the Spatial Relationship of the Improved SIFT, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, July 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 657-661.
15. Qiuzhe Yu, Dawen Ni, Yuxuan Jiang, Yuxuan Yan, Jiachun An, Tao Sun. Universal SAR and optical image registration via a novel SIFT framework based on nonlinear diffusion and a polar spatial-frequency descriptor, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, Vol. 171, pp. 1-17.
16. Sourabh Paul, Umesh C. Pati. Automatic optical-to-SAR image registration using a structural descriptor, *IET Image Processing*, November 2019, Vol. 14, No. 1, pp. 62-73.
17. Zhaoxiang Zhang, Yuelei Xu, Qi Cui, Qing Zhou, Linhua Ma. Unsupervised SAR and Optical Image Matching Using Siamese Domain Adaptation, *IEEE Transaction on geoscience and remote sensing*, May 2022, Vol. 60.
18. Skolnik M. I. Radar handbook. 3rd ed. New-York: The McGraw-Hill Companies, 1327 p.
19. El-Darymli K., Gill E.W., Mcquire P., Power D. and Moloney C. Automatic Target Recognition in Synthetic Aperture Radar Imagery: A State-of-the-Art Review, *IEEE Access*, 2016, Vol. 4, pp. 6014-6058.
20. Kostrov V.V., Tolstov E.F. Problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli s ispol'zovaniem kosmicheskikh RSA vysokogo razresheniya [Problems of remote sensing of the Earth using high-resolution space SAR], VII Vserossiyskie Armandovskie chteniya: molodaya shkola. Murom 27–29 iyunya 2017 goda [VII All-Russian Armandov Readings: young school. Murom, June 27–29, 2017], pp. 76-113.
21. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd ed. Springer Series in Statistics, 2009, 739 p.

Кулешов Сергей Викторович – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; e-mail: kuleshov@iias.spb.su; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88125083311 (доб. 1211); профессор РАН; д.т.н.; г.н.с.

Кваснов Антон Васильевич – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; e-mail: kvasnov.a@iias.spb.su; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88125083311 (доб. 1231); д.ф.-м.н.; в.н.с.

Зайцева Александра Алексеевна – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; e-mail: cher@iias.spb.su; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88125083311 (доб. 1231); к.т.н.; доцент; с.н.с.

Ронжин Андрей Леонидович – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; e-mail: ronzhin@iias.spb.su; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88125083311 (доб. 1111); профессор РАН; д.т.н.; профессор; г.н.с.

Kuleshov Sergey Viktorovich – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: kuleshov@iias.spb.su; St. Petersburg, Russia; phone: +78125083311 (ext. 1211); professor RAS; dr. of eng. sc.; chief researcher.

Kvasnov Anton Vasilievich – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: kvasnov.a@iias.spb.su; St. Petersburg, Russia; phone: +78125083311 (ext. 1231); dr. of phys. and math. sc.; leading researcher.

Zaytseva Alexandra Alekseevna – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: cher@iias.spb.su; St. Petersburg, Russia; phone: +78125083311 (ext. 1231); cand. of eng. sc.; senior researcher.

Ronzhin Andrey Leonidovich – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: ronzhin@iias.spb.su; St. Petersburg, Russia; phone: +78125083311 (ext. 1111); professor RAS; dr. of eng. sc.; professor; chief researcher.

К.А. Суминов, Н.А. Бочаров, М.А. Кирилук

**ОЦЕНКА АППАРАТНОГО СОСТАВА БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
СИСТЕМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ
РЕШАЕМЫХ ЗАДАЧ**

При создании современных робототехнических комплексов (РТК) наблюдается значительное разнообразие как аппаратных, так и программных решений, что создаёт дополнительные сложности при подборе рационального аппаратного и программного состава для обеспечения требуемой вычислительной мощности и эффективного решения поставленных задач. С одной стороны, зачастую приходится работать с уже установленным набором вычислительных комплексов (ВК), составляющих бортовую вычислительную систему (БВС) РТК, что существенно ограничивает возможности изменения программного состава и вынуждает адаптировать алгоритмы под фиксированные аппаратные ресурсы. С другой стороны, при наличии возможности изменения или создания нового аппаратного состава возникает задача выбора такой аппаратной компоновки, которая сможет удовлетворить вычислительным потребностям решаемых задач. В данной статье предлагается методика оценки аппаратного состава БВС РТК на основе решаемых задач, опирающаяся на использование многоверсионного программирования и построение паспортов решений. Каждый из вариантов программных решений для конкретной задачи дополняется в виде структурированного паспорта, содержащего как количественные, так и качественные характеристики, что позволяет проводить их детальный сравнительный анализ. На основе этих паспортов решений разрабатывается математическая модель, позволяющая подобрать набор вычислителей, способных обеспечить выполнение всех поставленных задач при одновременной минимизации суммарной стоимости, энергопотребления или других эксплуатационных характеристик БВС. Математически рассматриваемая задача сводится к обобщённой задаче о мультипликативном многомерном рюкзаке с мультивыбором и дополнительными ограничениями, что позволяет учитывать как ресурсные, так и топологические зависимости между решаемыми задачами. Приведены результаты экспериментов, выполненных с использованием разработанного экспериментального стенда, которые демонстрируют практическую применимость методики и подтверждают возможность её использования для получения количественных оценок вариантов аппаратного состава БВС РТК. Данный подход может быть адаптирован для различных типов РТК, что позволяет использовать его в смежных исследованиях в области оптимизации вычислительных систем для робототехнических комплексов.

Многоверсионное программирование; паспорта решений; бортовые вычислительные системы; робототехнические комплексы; мультипликативный многомерный рюкзак; аппаратный состав БВС РТК.

К.А. Suminov, N.A. Bocharov, M.A. Kirilyuk

**ASSESSMENT OF THE HARDWARE COMPOSITION OF ONBOARD COMPUTING
SYSTEMS OF ROBOTIC COMPLEXES BASED ON THE TASKS BEING SOLVED**

In the development of modern robotic complexes (RC), there is a significant diversity in both hardware and software solutions, which creates additional challenges in selecting a rational hardware and software composition to ensure the required computational power and to effectively address the assigned tasks. On one hand, it is often necessary to work with an already installed set of computing systems (CS) that form the onboard computing system (OCS) of the RC, which substantially limits the possibilities for modifying the software composition and necessitates the adaptation of algorithms to fixed hardware resources. On the other hand, when there is an opportunity to modify or create a new hardware composition, it becomes necessary to choose a hardware configuration that can meet the computational requirements of the tasks being solved. This article proposes a methodology for assessing the hardware composition of the OCS of RCs based on the tasks being solved, relying on the use of multiversion programming and the creation of solution passports. Each variant of the software solution for a specific task is supplemented by a structured passport that contains both quantitative and qualitative characteristics, allowing for a detailed comparative analysis. Based on these solution passports, a mathematical model is developed that enables the selection of a set of computing devices capable of executing all the assigned tasks while simultaneously minimizing the total cost, energy consumption, or other operational characteristics of the

OCS. Mathematically the problem under consideration is reduced to a generalized multiplicative multidimensional knapsack problem with multi-choice and additional constraints, which allows both resource and topological dependencies among the tasks being solved to be taken into account. Experimental results obtained using the developed simulation platform are presented, demonstrating the practical applicability of the methodology and confirming the possibility of using it to obtain quantitative estimates of the hardware composition variants of the OCS of RCs. This approach can be adapted for various types of RCs, which facilitates its use in related studies in the field of optimizing computing systems for robotic complexes.

Multiversion programming; solution passports; onboard computing systems; robotic complexes; multiplicative multidimensional knapsack; hardware composition of OCS.

Введение. В современных РТК наблюдается значительное разнообразие как аппаратных, так и программных решений. Такое разнообразие обусловлено стремительным развитием технологий, ростом требований к вычислительной мощности, энергоэффективности и интеллектуализации систем [1–4]. С одной стороны, зачастую в составе БВС используются уже установленные вычислительные комплексы, что ограничивает возможности изменения программного состава и вынуждает разработчиков адаптировать алгоритмы под фиксированные аппаратные ресурсы. С другой стороны, при наличии возможности изменения аппаратного состава и создания нового, возникает необходимость предварительной декомпозиции глобальной задачи РТК на более мелкие составляющие. Это позволяет подобрать аппаратную компоновку, которая способна удовлетворить вычислительным потребностям решаемых задач и обеспечить требуемую гибкость системы.

Разнообразие аппаратных решений проявляется в широком спектре устройств – от энергоэффективных, но менее производительных модулей до современных вычислителей с высоким уровнем обработки, большим количеством ядер и специализированными ускорителями [5–8]. Аналогичным образом, программное обеспечение для РТК представлено множеством альтернативных реализаций одного и того же функционала [9, 10]. Каждая из этих альтернатив характеризуется различными параметрами: затратами ресурсов, временем исполнения, точностью обработки и т.д.

Возникает потребность оценки аппаратного состава БВС, которая учитывает специфику как аппаратной части, так и программных решений. Т.е. возникает необходимость формирования рациональной аппаратной конфигурации БВС РТК, способной обеспечить выполнение всех необходимых вычислительных задач при ограниченных ресурсах.

Математически решение такой задачи может быть сведено к обобщенной задаче о многомерном мультипликативном рюкзаке с мультिवыбором [11] и дополнительными ограничениями в виде топологических зависимостей задач и т.д. Решение такой задачи может быть основано на создании многоверсионных библиотек с использованием паспортов решений [12]. Рассмотрим эти задачи более подробно.

Построение многоверсионных библиотек. Многоверсионные библиотеки представляют собой совокупности альтернативных программных решений для поставленных РТК задач. Для каждой задачи разрабатываются несколько вариантов реализации алгоритмов, которые могут отличаться по времени выполнения, потреблению ресурсов, качеству результатов и другим характеристикам. Каждое такое альтернативное решение дополняется паспортом в виде структурированного описания, содержащего как количественные, так и качественные показатели каждого решения.

По своей сути многоверсионные библиотеки используются для формирования некоторой базы данных программных решений, на основе которых становится возможной оценка аппаратного состава БВС. Исходя из паспортов решений, становится возможно проводить сравнительный анализ требований таких решений и, таким образом, подбирать набор вычислителей, способных обеспечить выполнение поставленных задач с минимальными затратами по стоимости, энергопотреблению или другим характеристикам. Общий вид таких паспортов для M задач, полученных в результате декомпозиции глобальной задачи РТК, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Общий вид паспортов для М задач

Номер параметра	Тип параметра	Задача 1			...	Задача М
		1	...	C_1		...
1	кат.	$f_{111}(\overline{x_{111}})$	...	$f_{1C_11}(\overline{x_{1C_11}})$	...	$f_{MC_{M1}}(\overline{x_{MC_{M1}}})$
...	...	...	...	...	...	...
z	кат.	$f_{11z}(\overline{x_{11z}})$	...	$f_{1C_1z}(\overline{x_{1C_1z}})$	...	$f_{MC_{Mz}}(\overline{x_{MC_{Mz}}})$
z + 1	функц.	x_{111}	...	x_{1C_11}	...	$x_{MC_{M1}}$
...	...	...	...	...	...	...
z + N	функц.	x_{11N-z}	...	x_{1C_1N-z}	...	$x_{MC_{MN-z}}$
...	...	...	...	...	...	...
N + E	кач	u_{11E}		u_{1C_1E}	...	$u_{MC_{ME}}$

Формально результат может быть описан следующим образом:

Дано М задач, которые необходимо решать. Для каждой i-ой задачи, где $i = \{1, 2, \dots, M\}$, построено C_i решений. В общем виде, каждое решение описывается вектором s_{ij} длиной N, где N – количество рассматриваемых в системе параметров, $j = \{1, 2, \dots, C_i\}$ – номер решения i-ой задачи. При этом каждое значение вектора может иметь либо категориальный тип, либо тип функциональной зависимости от набора собственных параметров, описывающей зависимость для текущего параметра. Категориальные признаки описываются как, x_{ijk} , функциональные признаки описываются как $f_{ijk}(\overline{x_{ijk}})$, где k – номер признака в текущем решении, $\overline{x_{ijk}}$ – вектор параметров функциональной зависимости k-го признака j-го решения i-й задачи. Каждое решение имеет z функциональных признаков и, соответственно, (N – z) категориальных признаков. Также вектор s_{ij} необходимо дополнить компонентами показателей качества. Пусть E – общее количество частных показателей качества, оцениваемых в частных решениях, тогда вектор s_{ij} примет следующий вид

$$s_{ij} = \begin{pmatrix} f_{ij1}(\overline{x_{ij1}}) \\ f_{ij2}(\overline{x_{ij2}}) \\ \vdots \\ f_{ijz}(\overline{x_{ijz}}) \\ x_{ij1} \\ x_{ij2} \\ \vdots \\ x_{ijN-z} \\ u_{ij1} \\ u_{ij2} \\ \vdots \\ u_{ijE} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Размерность этого вектора равна (N + E).

Тогда набор решений S_i для i-ой задачи может быть представлен матрицей размерностью N x C_i . Такая матрица имеет следующий вид:

$$S_i = \begin{pmatrix} f_{i11}(\overline{x_{i11}}) & f_{i21}(\overline{x_{i21}}) & \dots & f_{iC_i1}(\overline{x_{iC_i1}}) \\ f_{i12}(\overline{x_{i12}}) & f_{i22}(\overline{x_{i22}}) & \dots & f_{iC_i2}(\overline{x_{iC_i2}}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{i1z}(\overline{x_{i1z}}) & f_{i2z}(\overline{x_{i2z}}) & \dots & f_{iC_iz}(\overline{x_{iC_iz}}) \\ x_{i11} & x_{i21} & \dots & x_{iC_i1} \\ x_{i12} & x_{i22} & \dots & x_{iC_i2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i1N-z} & x_{i2N-z} & \dots & x_{iC_iN-z} \\ u_{i11} & u_{i21} & \dots & u_{iC_i1} \\ u_{i12} & u_{i22} & \dots & u_{iC_i2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{i1E} & u_{i2E} & \dots & u_{iC_iE} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Матрица S_i может быть разделена на три матрицы Sx_i , Sf_i , Su_i , где Sx_i содержит только категориальные признаки и имеет размерность $z \times C_i$, Sf_i содержит только функциональные признаки решений i -й задачи и имеет размерность $(N - z) \times C_i$, а Su_i содержит только показатели качества решений i -й задачи и имеет размерность $E \times C_i$.

$$S_i = \begin{pmatrix} Sf_i \\ Sx_i \\ Su_i \end{pmatrix} \quad (3)$$

Для каждой i -ой из M задач решения описываются в виде матрицы S_i . Тогда все решения можно представить в виде блочной матрицы решений R :

$$R = (S_1 \ S_2 \ \dots \ S_M) = \begin{pmatrix} Sf_1 & Sf_2 & \dots & Sf_M \\ Sx_1 & Sx_2 & \dots & Sx_M \\ Su_1 & Su_2 & \dots & Su_M \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Размерность матрицы решений будет $(N + E) \times (\sum_{i=1}^M C_i)$.

Для каждой поставленной задачи выбирается конкретное частное решение из построенного множества возможных решений этой задачи. Тогда конфигурация программных решений в конкретный момент может быть описана как вектор:

$$W = (w_1 \ w_2 \ \dots \ w_M), \quad (5)$$

где w_M – индекс выбранного в текущей конфигурации решения для задачи M и $w_i = \{1, 2, \dots, C_i\}$.

Задача поиска аппаратного состава БВС РТК. Поставленную задачу поиска аппаратного состава БВС РТК на основе паспортов решений можно свести к обобщённой задаче о мультипликативном многомерном рюкзаке с дополнительными ограничениями, что каждый класс может быть представлен только в одном рюкзаке. Кроме того, следует учесть, что некоторые решения могут зависеть от решения задач других групп (например, распознавание может зависеть от обнаружения), а также требуют решения задач, являющихся для них вспомогательными, но не представляющими ценности в обособленном виде.

Рассмотрим формулировку задачи в контексте имеющейся задачи получения количественных оценок вариантов создания вычислительных комплексов:

Пусть имеется:

Множество задач $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$, где n – количество задач, каждая задача r_i , $i = 1, 2, \dots, n$, имеет:

- ♦ описательные параметры – название задачи r_name_i , идентификатор задачи r_id_i , время исполнения задачи t_i , и показатель детализации d_i .

- ♦ потребляемые ресурсы – m различных типов, представленные вектором Wr_i , так, что $Wr_{ij} \geq 0$ – значение потребления ресурса j -го типа для решения i , $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$.

- ♦ вектор состояния зависимостей Sr_i содержащий сведения о зависимостях i -й задачи по версии необходимых библиотек, устройств, архитектуре исполняющего вычислителя и т.д. необходимых для данной задачи,

$Sr_i = \{Sr_{i1}, Sr_{i2}, \dots, Sr_{ip}\}$, где p – длина вектора, т.е. количество зависимостей. Таким образом, i -я задача описывается r_i , где $r_i = \{r_name_i, r_id_i, t_i, d_i, Wr_i, Sr_i\}$, и длина вектора $r_i = 4 + m + p$

Также имеется множество типов вычислителей $C = \{c_1, c_2, \dots, c_y\}$, где y – количество типов вычислителей, каждый тип вычислителя c_k , $k = 1, 2, \dots, y$ имеет:

- ♦ описательные параметры – название вычислителя c_name_i , стоимость одного вычислителя k -го типа c_cost_k , частота работы вычислителя c_freq_k , количество ядер k -го типа вычислителя c_cores_k , производительность k -го вычислителя c_GFlops_k , мощность k -го вычислителя c_TDP_k .

- ♦ объём имеющихся у него ресурсов m различных типов представленный вектором Wc_k , так, что $Wc_{kj} \geq 0$, – ограничение на ресурс j -го типа для вычислителя k -го типа, $j = 1, 2, \dots, m$, $k = 1, 2, \dots, y$.

♦ вектор состояния вычислителя Sc_k описывающий состояние k -го значения, соответствующее зависимостям задач Sr_i (версии программных библиотек на данном типе вычислителя, архитектуры вычислителя и др.).

$Sc_k = \{Sc_{k1}, Sc_{k2}, \dots, Sc_{kp}\}$, где p – длина вектора, т.е. количество зависимостей.

Таким образом, k -й вычислитель описывается вектором c_k , где

$c_k = \{c_name_k, c_cost_k, c_freq_k, c_cores_k, c_GFlops_k, c_TDP_k, Wc_k, Sc_k\}$ и длина вектора $c_k = 6 + m + p$.

Длины векторов Wr_i , и Wc_k равны между собой и составляют m ,

$i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, y$. Значения Wr_{ij} , и Wc_{kj} , $i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, y$,

$j = 1, 2, \dots, m$, одинаковую характеристику с точки зрения имеющегося и необходимого значения соответственно.

Длины векторов Sr_i , и Sc_k равны между собой и составляют p , $i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, y$. Значения Sr_{ij} , и Sc_{kj} , $i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, y, j = 1, 2, \dots, p$, одинаковую характеристику с точки зрения имеющегося и необходимого значения соответственно.

Требуется сформировать набор вычислителей из доступных типов, который будет обеспечивать решение всех поставленных задач. Т.е. такую, компоновку, при которой можно разметить все задачи для исполнения на вычислителях.

Каждая задача может быть размещена только на одном вычислителе и не может распределяться между несколькими вычислителями

Выбранный набор должен быть минимальным по сумме стоимостей вычислителей c_cost и по сумме выделяемой мощности c_TDP .

Для размещения задач можно использовать вычислители любых типов в любом не отрицательном количестве, в том числе 0. Обозначим количество используемых вычислителей типа k через $c_count_k \geq 0, k = 1, 2, \dots, y$.

Задача с номером a может быть размещена на вычислителе на конкретном z -м экземпляре вычислителя типа b , где $0 \leq z \leq c_count_b$, где $a \in \{1, 2, \dots, n\}, b \in \{1, 2, \dots, y\}$, при условиях когда:

♦ вектор состояния вычислителя Sc_b удовлетворяет вектору состояния зависимостей Sr_a . Т.е. тогда, когда значения Sc_{bj} удовлетворяет требованию Sr_{aj} , $j = 1, 2, \dots, p$.

♦ объём потребляемых ресурсов задачи a не превосходит объём соответствующих оставшихся ресурсов на конкретном z -м экземпляре вычислителя типа b . Т.е. $Wr_{aj} \leq Wc_{bj} - H_{bjz}$, где H_{bjz} – суммарное потребление j -го ресурса на z -м вычислителе типа b . $j = 1, 2, \dots, m$.

Напишем более формальную постановку задачи:

Введём бинарную переменную $x_{i,k,z}$, равную 1, если задача i размещена на z -м экземпляре вычислителя типа k , и 0 – в противном случае:

$$x_{i,k,z} \in \{0,1\},$$

где $i = 1, \dots, n, k = 1, \dots, y, z$ – индекс экземпляра в пределах «максимально возможного» числа устройств данного типа.

Введём бинарную переменную $y_{k,z}$, равную 1, если z -й экземпляр вычислителя типа k выбран в итоговую конфигурацию и 0, если он не используется:

$$y_{k,z} \in \{0,1\}.$$

Тогда

$$c_count_k = \sum_{z=1}^n y_{k,z}. \quad (6)$$

Необходимо минимизировать две суммы:

Общая стоимость:

$$\sum_{k=1}^y (c_cost_k \cdot c_count_k). \quad (7)$$

Общий критерий TDP:

$$\sum_{k=1}^y (c_TDP_k \cdot c_count_k). \quad (8)$$

С учётом введённых переменных можно записать:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^y c_cost_k \cdot c_count_k &= \sum_{k=1}^y \sum_{z=1}^n c_cost_k y_{k,z} \\ \sum_{k=1}^y c_TDP_k \cdot c_count_k &= \sum_{k=1}^y \sum_{z=1}^n c_TDP_k y_{k,z} \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, в случае двухкритериальной оптимизации (двух целей) итоговая целевая функция может быть записана как:

$$\min \left(\sum_{k=1}^y \sum_{z=1}^n c_cost_k y_{k,z}, \sum_{k=1}^y \sum_{z=1}^n c_TDP_k y_{k,z} \right). \quad (10)$$

Или же, при различии приоритетов итоговая целевая функция может быть записана как:

$$\min \left(\alpha \left(\sum_{k,z} c_cost_k y_{k,z} \right) + \beta \left(\sum_{k,z} c_TDP_k y_{k,z} \right) \right). \quad (11)$$

При следующих ограничениях:

- ♦ каждая задача размещается ровно на одном экземпляре:

$$\sum_{k=1}^y \sum_{z=1}^n x_{i,k,z} = 1, \quad \forall i = 1, \dots, n. \quad (12)$$

- ♦ нельзя направить задачу на неиспользуемый вычислитель: если z-й экземпляр типа k не активирован ($y_{k,z} = 0$), то ни одна задача не может там находиться:

$$x_{i,k,z} \leq y_{k,z}, \quad \forall i = 1, \dots, n, k = 1, \dots, y, z = 1, \dots, n. \quad (13)$$

- ♦ на каждом экземпляре вычислителя: сумма потребления ресурса j всеми задачами, размещёнными на данном экземпляре (k, z), не должна превышать ресурсную ёмкость $Wc_{k,j}$ типа k:

$$\sum_{i=1}^n W r_{i,j} x_{i,k,z} \leq W c_{k,j} y_{k,z}, \quad \forall k = 1, \dots, y, z = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m. \quad (14)$$

- ♦ задача i может быть размещена на вычислителе типа k, если вектор Sc_k был совместим с вектором Sr_i . Введём обозначение

$$D_{i,k} = \begin{cases} 1, & \text{если задача } i \text{ совместима с вычислителем } k \text{ по зависимостям} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases},$$

тогда:

$$x_{i,k,z} \leq D_{i,k}, \quad \forall i = 1, \dots, n, k = 1, \dots, y, z = 1, \dots, n. \quad (15)$$

Оценка эффективности. В рамках работ, проводимых в ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука», был реализован описанный в работе подход для оценки аппаратного состава БВС РТК, исходя из стоящих задач, с использованием многоверсионного программирования. В качестве РТК рассматривались наземные РТК. Большинство РТК рассматриваемого типа оснащены системами технического зрения и планирования пути, [13–16] ввиду чего экспериментальные исследования проведены для задач этих классов. Были выбраны следующие частные задачи, стоящие перед БВС:

- ♦ задачи технического зрения: определение текстуры поверхности; обнаружение объектов интереса; классификация объектов интереса; сегментация областей движения; поиск геометрических примитивов 1-го и 2-го порядков; построение стереорекострукции сцены.
- ♦ задачи планирования пути: формирование графа проходимости; поиска пути на графе проходимости.

Для указанных задач были реализованы многоверсионные библиотеки. При построении паспортов, для получения характеристик альтернативных решений, был разработан комплексный экспериментальный стенд, структурная схема которого представлена на рис. 1. В качестве функциональных параметров решений рассматривались такие потребляемые ресурсы как: потребление памяти, потребление CPU, время исполнения, точность решений (детализация).

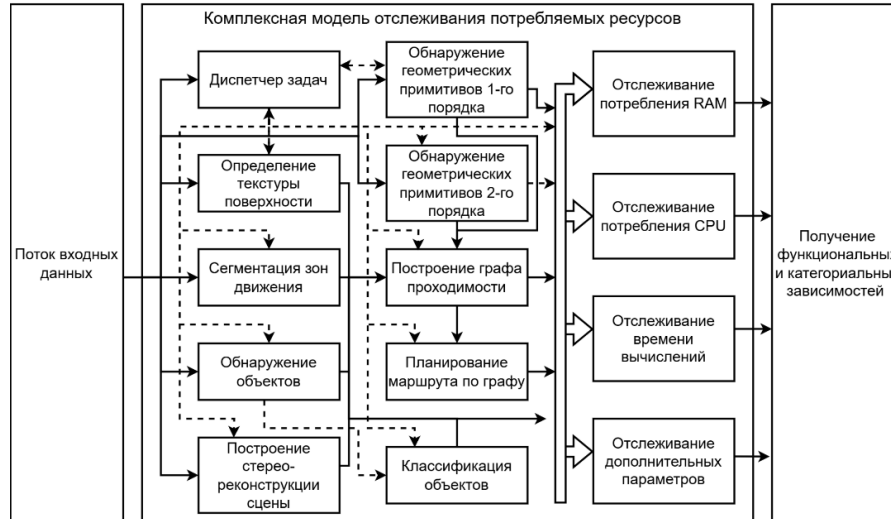


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда

На основе разработанных многоверсионных библиотек было проведено моделирование с целью получения оценок аппаратного состава БВС РТК.

На основе паспортов собраны конфигурационные файлы задач. Конфигурации сформированы для четырех вариантов исполнения, отличающихся количеством потребляемых ресурсов. Выбраны 4 конфигурации с различным потреблением ресурсов – от минимального, до максимального. В табл. 2 представлены выбранные конфигурации.

Таблица 2

Описание выбранных конфигураций

Конфигурация	1	2	3	4
Определение текстуры поверхности	200 x 200	400 x 400	600 x 600	800 x 800
Сегментация зон движения	640 x 360	800 x 450	1040 x 584	1200 x 674
Обнаружение объектов	224 x 224	350 x 350	546 x 546	682 x 682
Построение стереореконструкции сцены	1280 x 720 sbm	1280 x 720 sbm f	1280 x 720 sbgm	1280 x 720 sbgm f
Обнаружение геометрических примитивов 1-го порядка	491 x 307	654 x 409	817 x 511	1021 x 638
Обнаружение геометрических примитивов 2-го порядка	491 x 307	654 x 409	817 x 511	1021 x 638
Построение графа проходимости	3648	14592	32832	44688
Планирование маршрута по графу проходимости	bfs	Dijkstra	A *	D * lite
Классификация объектов	224 x 224	350 x 350	546 x 546	682 x 682

При проведении эксперимента в качестве возможных вычислительных комплексов, входящих в БВС РТК, рассматривались ВК на основе отечественных микропроцессоров серии «Эльбрус» [17–21]. В табл. 3 представлены рассматриваемые характеристики вычислителей. Значения указанных характеристик и потребляемых ресурсами являются относительными и рассчитаны относительно «Эльбрус – 8С».

Таблица 3

Характеристики рассматриваемых ВК

CPU_name	e4c	e1c+	e8c	e8c2	e16c	e2c3	r2000
CPU_frequency	800	1000	1300	1500	2000	2000	2000
Cores	4	1	8	8	16	2	8
GFlops	25	24	125	288	768	96	64
TDP	45	10	70	80	110	15	30
RAM	96000	32000	256000	256000	256000	128000	32000

Разработанная программная реализация описывает количество и типы необходимых вычислителей, распределение задач по вычислителям, распределение вычислителей по задачам, а также суммарные потребляемые ресурсы.

Полученные количественные оценки вариантов аппаратного состава БВС РТК на основе отечественных разнородных аппаратно-программных платформ: для сценария 1 – 2 МП «Эльбрус-2С3», для сценария 2 – 2 МП «Эльбрус-2С3», 1 МП «Эльбрус-1С+», для сценария 3 – МП «Эльбрус-2С3», МП «Эльбрус-8С2», для сценария 4 – 2 МП «Эльбрус-2С3», МП «Эльбрус-8С2».

Заключение. Предложен подход к решению задачи выбора аппаратного состава бортовых вычислительных систем робототехнических комплексов с учётом специфики решаемых задач и особенностей вычислительных комплексов. Предложенный подход сводится к решению обобщённой задачи о многомерном мультипликативном рюкзаке с мультивыбором и другими ограничениями. Основой для решения является построение многоверсионных библиотек альтернативных решений и составление их паспортов, в которых фиксируются количественные и качественные характеристики каждого варианта.

Для обеспечения возможности построения паспортов решений и проведения экспериментальных исследований разработан комплексный экспериментальный стенд, который позволяет измерять потребление ресурсов программных решений.

В ходе экспериментального исследования рассмотрены различные конфигурации наборов задач, отражающие различные эксплуатационные условия – от экономичного до высоконагруженного режима работы. Эти конфигурации отличаются по объёму потребляемых вычислительных ресурсов, времени исполнения и качественным показателям решений, что позволяет оценить эффективность различных вариантов аппаратного состава в условиях ограниченности ресурсов.

В результате проведённых исследований получены количественные оценки вариантов создания бортовых вычислительных систем на основе отечественных разнородных аппаратно-программных платформ. Полученные данные демонстрируют возможность выбора рациональных вариантов компоновки вычислительной системы, способных удовлетворить специфические требования по производительности, энергопотреблению и другим ключевым характеристикам.

Таким образом, показано, что предложенный подход к оценке аппаратного состава бортовых вычислительных систем РТК, основанный на использовании многоверсионных библиотек и паспортов решений, позволяет получать количественные оценки вариантов их конфигурации с учётом специфики решаемых задач и вычислительных комплексов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Valavanis K.P., Saridis G.N. Intelligent robotic systems: theory, design and applications // Springer Science & Business Media. – 2012. – Vol. 182.
2. Lai R., Lin W., Wu Y. Review of Research on the Key Technologies, Application Fields and Development Trends of Intelligent Robots // International Conference on Intelligent Robotics applications. – Springer, Cham, 2018. – P. 449-458.

3. Макаров И.М., Лохин В.М. Интеллектуальные системы автоматического управления. – М.: Физматлит, 2001.
4. Rault R., Trentesaux D. Artificial intelligence, autonomous systems and robotics: legal innovations // Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing: Proceedings of SOHOMA 2017. – 2018. – P. 1-9.
5. Суминов К.А., Бочаров Н.А. Исследование ограничений применимости микропроцессоров ряда Эльбрус для решения задач технического зрения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1 (225). – С. 279-288. – DOI: 10.18522/2311-3103-2022-1-279-288. – EDN GABABO.
6. Rojas-Perez L.O., Martínez-Carranza J. On-board processing for autonomous drone racing: An overview // Integration. – 2021. – Vol. 80. – P. 46-59.
7. Gonzalez-Arjona D. et al. On-board implementation // Modern Spacecraft Guidance, Navigation, and Control. – Elsevier, 2023. – P. 685-712.
8. Кирилюк М.А., Бочаров Н.А., Парамонов Н.Б., Суминов К.А. Разработка и оценка эффективности метода организации вычислений на специализированных вычислительных системах с квантовым сопроцессором // Приборы. – 2024. – № 3 (285). – С. 12-20. – EDN TPQGGM.
9. Парамонов Н.Б., Минин И.В. Многоверсионное моделирование в ходе проектирования информационных систем // Межотраслевая информационная служба. – 2014. – № 1. – С. 40-44.
10. Chen Liming, Avizlenlsn Algirdas. Version Programming: A Fault-Tolerance Approach to Reliability of Software Operation // IEEE Transactions on Software Engineering. – 1985. – Vol. SE-11, No. 12.
11. Martello S. Knapsack problems: Algorithms and computer implementations. – John Wiley & Sons, New York, NY United States, 1990. – 296 p. – ISBN:978-0-471-92420-3.
12. Суминов К.А. Метод формирования многоверсионных библиотек функциональных программ бортовых вычислительных систем робототехнических комплексов // Приборы. – 2025. – № 1 (295). – С. 7-13.
13. Bocharov N., Slavin O., Suminov K., Paramonov N. Modeling of Technical Vision System of Robots Based on Elbrus Microprocessors // IEEE Proceedings of 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, 08–10 ноября 2023 года. Vol. 5. – Lipetsk: Lipetsk State Technical University, 2023. – P. 572-577. – DOI: 10.1109/SUMMA57301.2022.9974116. – EDN FMKKQO.
14. Pérez L. et al. Robot guidance using machine vision techniques in industrial environments: A comparative review // Sensors. – 2016. – Vol. 16, No. 3. – P. 335.
15. Фельдман В.М., Волин В.С., Черепанов С.А. [и др.]. Решение задач робототехники на перспективных отечественных вычислителях // Приборы. – 2021. – № 5 (251). – С. 28-35. – EDN EKDPQG.
16. Gasparetto A. et al. Path planning and trajectory planning algorithms: A general overview // Motion and operation planning of robotic systems: Background and practical approaches. – 2015. – P. 3-27.
17. Бычков И.Н., Чучко П.А. Решения для средств вычислительной техники на основе процессора "Эльбрус-8СВ" // Наноиндустрия. – 2019. – № S(89). – С. 57-59. – DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.57.59. – EDN EYYLIT.
18. Бычков И.Н., Лобанов И.Н., Молчанов И.А. Вычислительная техника на основе аппаратно-программной платформы "Эльбрус" для перспективных информационных систем // Приборы. – 2018. – № 8 (218). – С. 14-20. – EDN YQWZGX.
19. Ким А.К., Перекатов В.И., Сахин Ю.Х. Развитие и реализация архитектуры вычислительных комплексов серии "Эльбрус" для решения задач ракетно-космической обороны // Вопросы радиоэлектроники. – 2010. – Т. 3, № 3. – С. 5-17. – EDN NZGZMX.
20. Ким А.К., Волконский В.Ю., Груздов Ф.А. [и др.]. Микропроцессорные вычислительные комплексы с архитектурой "Эльбрус" и их программное обеспечение // Вопросы радиоэлектроники. – 2009. – Т. 4, № 3. – С. 5-37.
21. Руководство по эффективному программированию на платформе «Эльбрус». – URL: http://www.mcst.ru/elbrus_prog электронный ресурс (дата обращения 12.12.2024).

REFERENCES

1. Valavanis K.P., Saridis G.N. Intelligent robotic systems: theory, design and applications, Springer Science & Business Media, 2012, Vol. 182.
2. Lai R., Lin W., Wu Y. Review of Research on the Key Technologies, Application Fields and Development Trends of Intelligent Robots, International Conference on Intelligent Robotics applications. Springer, Cham, 2018, pp. 449-458.
3. Makarov I.M., Lokhin V.M. Intellektual'nye sistemy avtomaticheskogo upravleniya [Intelligent automatic control systems]. Moscow: Fizmatlit, 2001.

4. Rault R., Trentesaux D. Artificial intelligence, autonomous systems and robotics: legal innovations, *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing: Proceedings of SOHOMA 2017*, 2018, pp. 1-9.
5. Suminov K.A., Bocharov N.A. Issledovanie ogranicheniy primenimosti mikroprotssessorov ryada El'brus dlya resheniya zadach tekhnicheskogo zreniya [Study of limitations of applicability of Elbrus series microprocessors for solving problems of machine vision], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1 (225), pp. 279-288. DOI: 10.18522/2311-3103-2022-1-279-288. EDN GABABO.
6. Rojas-Perez L.O., Martínez-Carranza J. On-board processing for autonomous drone racing: An overview, *Integration*, 2021, Vol. 80, pp. 46-59.
7. Gonzalez-Arjona D. et al. On-board implementation, *Modern Spacecraft Guidance, Navigation, and Control*. Elsevier, 2023, pp. 685-712.
8. Kirilyuk M.A., Bocharov N.A., Paramonov N.B., Suminov K.A. Razrabotka i otsenka effektivnosti metoda organizatsii vychisleniy na spetsializirovannykh vychislitel'nykh sistemakh s kvantovym soprotssessorom [Development and efficiency assessment of the method for organizing computations on specialized computing systems with a quantum coprocessor], *Pribory* [Devices], 2024, No. 3 (285), pp. 12-20. EDN TPQGGM.
9. Paramonov N.B., Minin I.V. Mnogoversionnoe modelirovanie v khode proektirovaniya informatsionnykh sistem [Multi-version modeling during the design of information systems], *Mezhotraslevaya informatsionnaya sluzhba* [Interindustry Information Service], 2014, No. 1, pp. 40-44.
10. Chen Liming, Avizlenlsn Algirdas. Version Programming: A Fault-Tolerance Approach to Reliability of Software Operation, *IEEE Transactions on Software Engineering*, 1985, Vol. SE-11, No. 12.
11. Martello S. Knapsack problems: Algorithms and computer implementations. John Wiley & Sons, New York, NY United States, 1990, 296 p. ISBN:978-0-471-92420-3.
12. Suminov K.A. Metod formirovaniya mnogoversionnykh bibliotek funktsional'nykh programm bortovykh vychislitel'nykh sistem robototekhnicheskikh kompleksov [Method for forming multi-version libraries of functional programs of on-board computing systems of robotic complexes], *Pribory* [Devices], 2025, No. 1 (295), pp. 7-13.
13. Bocharov N., Slavin O., Suminov K., Paramonov N. Modeling of Technical Vision System of Robots Based on Elbrus Microprocessors, *IEEE Proceedings of 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, Lipetsk, 08–10 November 2023. Vol. 5. Lipetsk: Lipetsk State Technical University, 2023, pp. 572-577. DOI: 10.1109/SUMMA57301.2022.9974116. EDN FMKKQO.
14. Pérez L. et al. Robot guidance using machine vision techniques in industrial environments: A comparative review, *Sensors*, 2016, Vol. 16, No. 3, pp. 335.
15. Fel'dman V.M., Volin V.S., Cherepanov S.A. [i dr.]. Reshenie zadach robototekhniki na perspektivnykh otechestvennykh vychislitel'yakh [Solving robotics problems on promising domestic computers], *Pribory* [Devices], 2021, No. 5 (251), pp. 28-35. EDN EKDPQG.
16. Gasparetto A. et al. Path planning and trajectory planning algorithms: A general overview, *Motion and operation planning of robotic systems: Background and practical approaches*, 2015, pp. 3-27.
17. Bychkov I.N., Chuchko P.A. Resheniya dlya sredstv vychislitel'noy tekhniki na osnove protssessora "El'brus-8SV" [Solutions for computing equipment based on the Elbrus-8SV processor], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2019, No. S(89), pp. 57-59. DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.57.59. – EDN EEYLIT.
18. Bychkov I.N., Lobanov I.N., Molchanov I.A. Vychislitel'naya tekhnika na osnove apparatno-programmnoy platformy "El'brus" dlya perspektivnykh informatsionnykh sistem [Computing equipment based on the Elbrus hardware and software platform for advanced information systems], *Pribory* [Devices], 2018, No. 8 (218), pp S. 14-20. EDN YQWZGX.
19. Kim A.K., Perekatov V.I., Sakhin Yu.Kh. Razvitie i realizatsiya arkhitektury vychislitel'nykh kompleksov serii "El'brus" dlya resheniya zadach raketno-kosmicheskoy oborony [Development and implementation of the architecture of computing complexes of the Elbrus series for solving problems of rocket and space defense], *Voprosy radioelektroniki* [Questions of Radio Electronics], 2010, Vol. 3, No. 3, pp. 5-17. EDN NZGZMX.
20. Kim A.K., Volkonskiy V.Yu., Gruzlov F.A. [i dr.]. Mikroprotssessornye vychislitel'nye komplekсы s arkhitekturoy "El'brus" i ikh programmnoe obespechenie [Microprocessor computing complexes with the Elbrus architecture and their software], *Voprosy radioelektroniki* [Questions of Radio Electronics], 2009, Vol. 4, No. 3, pp. 5-37.
21. Rukovodstvo po effektivnomu programmirovaniyu na platforme «El'brus». Available at: http://www.mcst.ru/elbrus_prog_elektronnyy_resurs (accessed 12 December 2024).

Суминов Константин Александрович – ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»; e-mail: Konstantin.A.Suminov@mcst.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74991355336; начальник отдела.

Бочаров Никита Алексеевич – ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; г. Москва, Россия; тел.: +79167346437; к.т.н.; зам. руководителя управления; г.н.с.

Кирилюк Михаил Андреевич – ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»; e-mail: kirilyuk_m@ineum.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79055273011; к.т.н.; начальник отдела; с.н.с.

Suminov Konstantin Alexandrovich – JSC «INEUM»; e-mail: Konstantin.A.Suminov@mcst.ru; Moscow, Russia; phone: +74991355336; head of department.

Bocharov Nikita Alexeevich – JSC «INEUM»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; Moscow, Russia; phone: +79167346437; cand. of eng. sc.; deputy head of division; chief researcher.

Kirilyuk Mikhail Andreevich – JSC «INEUM»; e-mail: Mikhail.A.Kirilyuk@mcst.ru; Moscow, Russia; phone: +79055273011; cand. of eng. sc.; head of department, senior researcher.

УДК 621.391:004.032.26

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-289-298

Д.В. Шумков, И.В. Титков, П.А. Гулевич

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В ИНТЕРЕСАХ РАДИОМОНИТОРИНГА

Рассматривается исследование возможности применения свёрточных нейронных сетей (СНС) для технического распознавания объектов (ТРО) в контексте радиомониторинга. Основное внимание уделяется разработке и оптимизации алгоритмов обработки радиолокационных сигналов с использованием глубоких нейронных сетей. Исследования показали, что применение СНС позволяет существенно повысить точность классификации радиосигналов по сравнению с традиционными методами обработки. Разработанный подход основан на извлечении иерархических признаков из спектральных изображений радиосигналов и их последующей классификации с помощью обученной нейронной сети. В работе представлены результаты экспериментальных исследований, проведённых на наборе данных, включающем более 10 000 образцов радиосигналов различных типов. Показано, что предложенная методика обеспечивает точность распознавания до 93% при работе с зашумлёнными сигналами и вероятность ложной тревоги не более 0,05. Особое внимание уделено вопросам выбора архитектуры нейронной сети под специфику задачи радиомониторинга. Также было детально рассмотрены варианты преобразования в спектральное изображение радиосигналов, для обработки в режиме реального времени. Разработаны методы предварительной обработки данных, включающие нормализацию амплитуды, частотную коррекцию и устранение помех. Результаты исследования могут найти применение в системах контроля радиоэфира и обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования СНС в задачах технического распознавания объектов радиомониторинга и открывают новые возможности для развития методов интеллектуальной обработки радиолокационной информации. Перспективные направления дальнейших исследований включают разработку адаптивных методов обучения нейронных сетей в условиях изменяющейся радиообстановки и создание гибридных систем, сочетающих традиционные методы обработки сигналов с современными нейросетевыми алгоритмами.

Радиомониторинг; свёрточные нейронные сети; классификация объектов в радиоэфире; метод; алгоритм; эксперимент.

D.V. Shumkov, I.V. Titkov, P.A. Gulevich

APPLICATION OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS FOR TECHNICAL OBJECT RECOGNITION IN THE INTERESTS OF RADIO MONITORING

The article examines the possibility of using convolutional neural networks for technical object recognition in the context of radio monitoring. The focus is on the development and optimization of algorithms for processing radar signals using deep neural networks. Studies have shown that the use of CNN can significantly improve the classification accuracy of radio signals compared to traditional processing

methods. The developed approach is based on the extraction of hierarchical features from spectral images of radio signals and their subsequent classification using a trained neural network. The paper presents the results of experimental studies conducted on a dataset of more than 10,000 samples of radio signals of various types. It is shown that the proposed technique ensures recognition accuracy of up to 94% when working with noisy signals and the probability of a false alarm is no more than 0.05. Special attention is paid to the choice of neural network architecture for the specifics of the radio monitoring task. The options for converting radio signals into a spectral image for real-time processing were also considered in detail. Data preprocessing methods have been developed, including amplitude normalization, frequency correction, and interference elimination. The results of the study can be used in radio broadcast control systems and to ensure electromagnetic compatibility of electronic devices. The results obtained demonstrate the prospects of using CNN in the tasks of technical recognition of radio monitoring objects and open new opportunities for the development of intelligent radar information processing methods. Promising areas of further research include the development of adaptive neural network training methods in a changing radio environment and the creation of hybrid systems combining traditional signal processing methods with modern neural network algorithms.

Radio monitoring; convolutional neural networks; classification of objects in radio; method; algorithm; experiment.

Введение. В современных условиях стремительного развития радиоэлектронных технологий и увеличения плотности радиозэфира особую актуальность приобретает задача эффективного технического распознавания объектов при радиомониторинге. Традиционные методы обработки радиосигналов, основанные на анализе отдельных параметров, демонстрируют ограниченную эффективность при работе со сложными сигналами в условиях помех и динамически изменяющейся обстановки [1–5].

В последние годы наблюдается растущий интерес к применению методов глубокого обучения для решения задач радиомониторинга. Особую перспективу демонстрируют СНС, показавшие высокую эффективность в задачах обработки изображений и временных рядов [6]. При этом специфика работы с радиосигналами требует разработки специализированных архитектур и методик обучения СНС, учитывающих особенности радиозэфира.

Целью данной работы является исследование возможностей применения сверточных нейронных сетей для технического распознавания объектов при радиомониторинге.

Основная часть. Для рассматриваемой задачи было принято решение разработать способ ТРО радиомониторинга с использованием нейронных сетей. При разработке способа были вынесены за рамки исследования следующие вопросы: особенности и правила добавления примеров из существующей обучающей выборки для обучения нейронной сети, особенности и критерии принятия решения о количестве замороженных слоев при обучении сверточной нейронной сети методом «переноса обучения» (*Transfer Learning*) [7].

По результатам [8] выбора методов, входящих в составные части способа ТРО радиомониторинга с использованием нейронных сетей, далее будут описываться каналы и правила приема информации о появлении новых объектов радиомониторинга от внешних источников информации [9].

Входными данными для применения способа являются:

а) в режиме классификации:

♦ принятый радиозэфир ($f_{\text{нижняя}}$ – нижняя частота спектра; $f_{\text{верхняя}}$ – верхняя частота спектра, $f_{\text{диап.}}$ – частотный диапазон, $t_{\text{радиозэфира}}$ – время принятого радиозэфира, $P_{\text{радиозэфира}}$ – мощность сигнала принятого радиозэфира);

б) в режиме накопления выборки и обучения нейронной сети:

♦ принятый радиозэфир ($f_{\text{нижняя}}$ – нижняя частота спектра; $f_{\text{верхняя}}$ – верхняя частота спектра, $f_{\text{диап.}}$ – частотный диапазон, $t_{\text{радиозэфира}}$ – время принятого радиозэфира, $P_{\text{радиозэфира}}$ – мощность сигнала принятого радиозэфира);

♦ перечень объектов классификации с привязкой по времени подтвержденного нахождения в зоне записи радиозэфира ($P_{\text{объект}}$ наименование объекта, работающая РЛС, режим работы РЛС в формате объект, тип РЛС, режим работы РЛС, $t_{\text{нач.фикс.}}$ $t_{\text{кон.фикс.}}$ время нахождения в зоне записи радиозэфира с ... по в формате дата : час : минуты : секунды).

По результатам применения способа получаем следующие данные:

а) в режиме классификации:

- ♦ распознанный объект радиомониторинга ($P_{\text{объект}}$ наименование объекта, работающая РЛС, режим работы РЛС в формате объект: тип РЛС : режим работы РЛС: вероятность классификации).

б) в режиме накопления выборки и обучения нейронной сети:

- ♦ весовые коэффициенты сверточной нейронной сети (представляет собой массив чисел, отражающий весовые коэффициенты межнейронных связей в формате [вес нейронной связи 1–1 слоя 1–2, вес нейронной связи 1–2 слоя 1–2 слоя, ... вес нейронной связи n - f слоя r -1- r слоя] к примеру [25292.383561, 136272.32865, ... , -5568.383561]);

- ♦ библиотека классов распознавания ($P_{\text{инс}}$ класс СНС – $P_{\text{объект}}$).

Процесс ТРО радиомониторинга с помощью нейронных сетей в соответствии с разработанным способом проходит по следующему алгоритму (рис. 1-3) [13]:

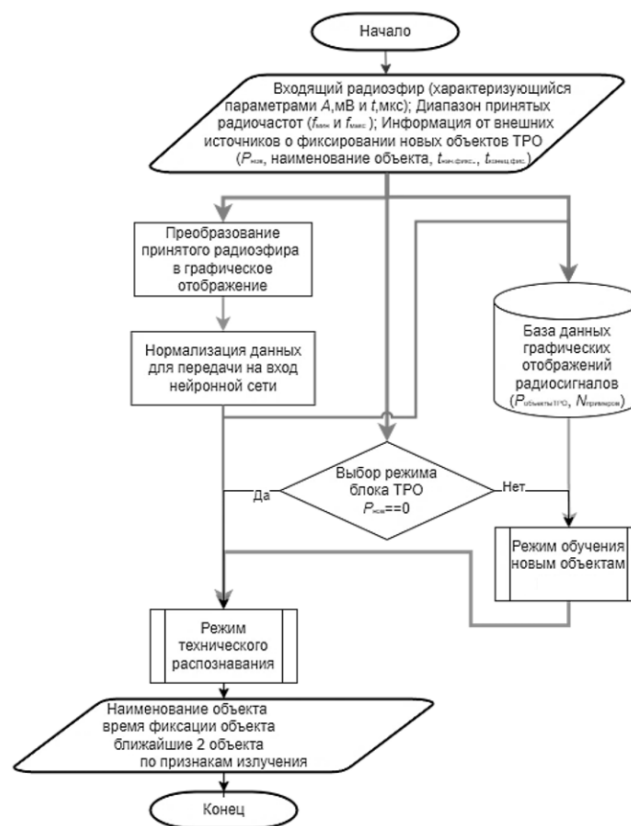


Рис. 1. Алгоритм работы технического распознавания объектов радиомониторинга с помощью нейронных сетей [13]

Входная информация: сигнал радиоэфира, принятый антенной, характеризующийся следующими параметрами A – амплитуда принятого сигнала во времени t , дБ, t – время и описываемый формулой 1 [10]:

$$S(t) = A \times e^{-i\omega_0 t}. \quad (1)$$

После приема сигнал преобразовывается с помощью оконного преобразования Фурье для разложения на частотный спектр по формуле (2) [11]:

$$STFT(\omega, t) = \frac{1}{\beta} \int_{-\infty}^{\infty} w(t - \tau) x(t) e^{-i\omega \tau} dt. \quad (2)$$

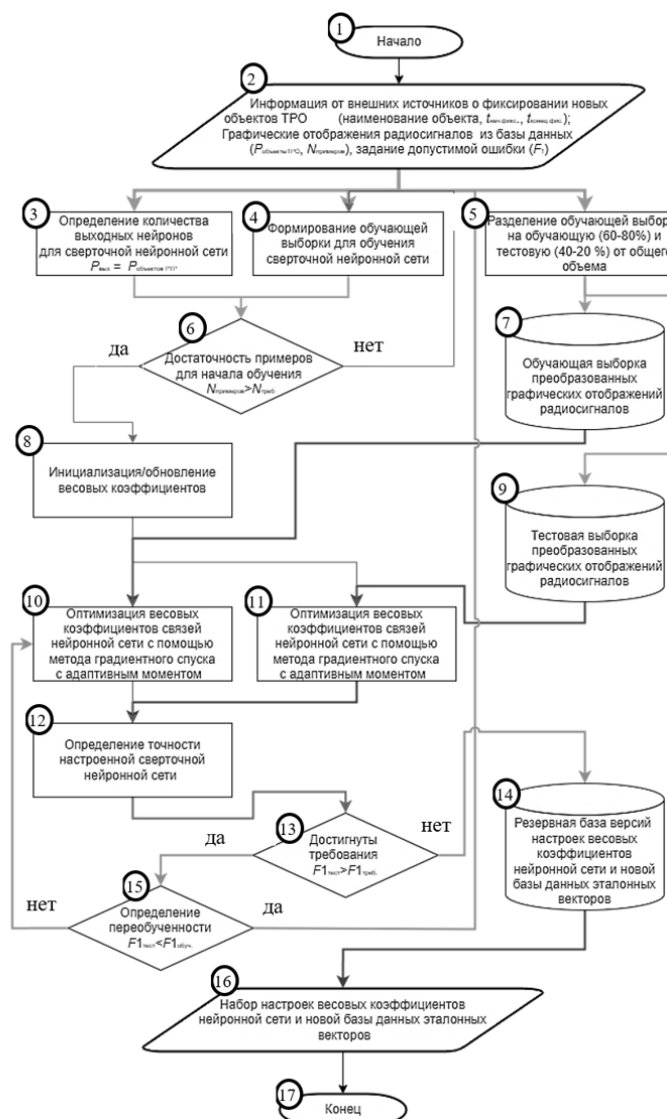


Рис. 2. Алгоритм ТРО радиомониторинга с нейронной сетью.
Блок обучения новым объектам [13]

Выходными параметрами на этом этапе являются $A(f, t)$ – амплитуда сигнала на частоте f в момент времени t , f – частотный спектр, t – момент времени.

Далее определяется интересующий частотный диапазон для поиска источников излучения $f_{\text{треб.}} = (f_{\text{мин.треб.}} : f_{\text{макс.треб.}})$. Для преобразования сигнала в графический портрет, подаваемый на вход нейронной сети необходимо провести нормализацию по формуле (3) [14]:

$$z' = \frac{z - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} (u - l) + l, \quad (3)$$

где z – исходные данные, z' – нормализованные данные, $z_{\max}$, $z_{\min}$ – максимальное и минимальное значение нормализуемых данных, u , l – верхнее и нижнее значение нового диапазона для нормализации данных, $z' \in [l; u]$.

После проведения нормализации преобразованный радиоэфир нарезается в графические отображения квадратной формы, где ширина и длина графического отображения будут соответствовать друг другу, это является необходимым условием для ускорения обработки сверточной нейронной сетью радиоэфира.

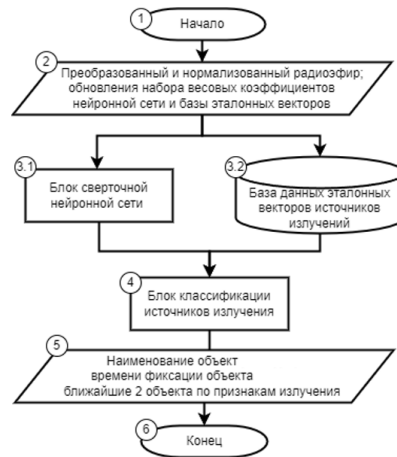


Рис. 3. Алгоритм ТРО радиомониторинга с нейронной сетью.
Блок технического распознавания [13]

Далее принимается решение о работе способа в режиме обучения, либо в режиме классификации по правилу (4) [13]:

$$P_{\text{нов}} == 0, \quad (4)$$

где $P_{\text{нов}}$ – количество новых объектов радиомониторинга, полученных в ходе приема радиоэфира.

При невыполнении условия, указанного в формуле (4), способ начинает работать в режиме обучения нейронной сети новым объектам радиомониторинга.

Для достижения данной задачи выделяется часть входящего радиоэфира, на котором было предположительно записано излучение нового объекта радиомониторинга.

Этап 1. Определяется количество выходных нейронов для новой нейронной сети исходя из количества объектов распознавания $P_{\text{вых.}} = P_{\text{объектов.ТРО}}$.

Этап 2. Принятие решения для первичного обучения нейронной сети либо для дообучения существующей нейронной сети новым объектам радиомониторинга.

Этап 3. Принятие решения о достаточности примеров для обучения или дообучения нейронной сети по правилу (5) [15]:

$$N_{\text{примеров}} \geq N_{\text{треб.}}, \quad (5)$$

где $N_{\text{примеров}}$ – количество примеров полученных для обучения СНС,

$N_{\text{треб.}}$ – количество примеров требуемых для обучения СНС.

Этап 4. Инициализация/обновление весовых коэффициентов обучаемой нейронной сети. Задание максимально допустимой ошибки на обучение. Указание дискретного шага обучения нейронной сети [15].

Этап 5. Оптимизация весовых коэффициентов нейронной сети с помощью метода адаптивного момента градиентного спуска, двух СНС на базе обучающей и тестовых выборок.

Этап 6. Сравнение полученных точностей, полученных на тестовой и обучающей выборках. Принятие решения об остановке обучения СНС при достижении состояния переобученности. Данное состояние характеризуется снижением показателя точности нейронной сети на тестовой выборке, более чем в двух эпохах обучения. Обучение останавливается, и наилучшая конфигурация нейронной сети, полученная в ходе обучения с показателями точности классификации, сравнивается с требуемыми показателями, выставленными заранее (6) [16]:

$$F_{1\text{тест}} \geq F_{1\text{треб.}} \quad (6)$$

При недостижении требований $F_{1\text{треб.}}$ способ переходит к исполнению этапа 4, в случае повторного перехода на этап 4 принимается решение о переходе к этапу 3 и увеличению показателя $N_{\text{треб.}}$ на 15%, после чего проводится повторение всех последующих пунктов.

При достижении требований $F_{\text{треб}}$ параметры нейронной сети (весовые коэффициенты и количество выходных нейронов (соответствующих новому количеству объектов радиомониторинга) передаются для работы в режиме классификации.

При выполнении условия, указанного в формуле (6), способ начинает работать в режиме ТРО.

Этап 1. Каждый из отрезков поступающего радиоэфира последовательно подается на вход обученной сверточной нейронной.

Этап 2. Происходит сложение всех весовых коэффициентов в нейронной сети, перемноженных на входные параметры (графического отображения радиоэфира). Результатом выполнения второго этапа является вероятностные данные о нахождении в радиоэфире того или иного источника излучения, в том числе об отсутствии каких-либо излучений. Выходом нейронной сети является вектор вида (7):

$$y = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_N], \quad (7)$$

где N – количество классифицируемых классов +1 класс [17].

К примеру: $y = [0.19, 0.24, 0.44, 0.04, 0.78, 0, 0, 0]$, что означает что в анализируемом эфире с вероятностью в 19% есть излучатель класса 1, с вероятностью 24% излучатель класса 2, с вероятностью 44% излучатель класса 3, с вероятностью 4% излучатель класса 4, с вероятностью 78% излучатель класса 5, принадлежность излучения к классам 6, 7 и 8 равно 0%.

Этап 3. Сопоставление полученного вектора с базой данных классов [18, 19], в которых описаны детальные характеристики, такие как излучатель сигнала, режим работы излучателя, объект управления, что и является конечной целью применения данного способа в интересах радиомониторинга. Итогом работы способа является информация следующего вида: с 15:57 по 16:10 14.10.2023 г. выявлена работа комплекса управления GCS-303, объект управления комплекса беспилотный дрон модели JOUAV CW-40 Gasoline, опознавательный номер JCW 4006 с вероятностью 78%.

Также можно указывать до 5 следующих выявленных объектов, тогда выдаваемая информация будет иметь вид (табл. 1):

Таблица 1

Выдаваемая информация по результатам применения способа [13]

Комплекс излучения	Объект управления	Бортовой номер	Вероятность, %
GCS-303	JOUAV CW-40 Gasoline	JCW 4006	78
GCS-303	JOUAV CW-40 Gasoline	JCW 4001	44
GCS-303	JOUAV CW-30E	JCW 3012	24
GCS-303	JOUAV CW-25H	JCW 2590	19
GCS-303	JOUAV CW-25H	JCW 2521	4

По результатам разработки способа можно построить концептуальную модель функционирования блока ТРО в комплексе радиомониторинга (рис. 4) [12].

Для подтверждения гипотезы о возможности применения разработанного способа было проведено компьютерное моделирование. Для проведения моделирования была выбрана база данных Национального института стандартизации и технологии США. Выбранная база данных включает в себя наборы записей радиолокационных станций одной и той же модели, но разных партий изготовления. Выбранные данные наилучшим образом подходят для проведения экспериментального исследования, так как в полной мере отражает проблему технического распознавания разных источников излучения с одинаковыми параметрами [18].

База данных состоит из 20000 размеченных записей сигналов, среди которых присутствуют 6 работающих радиолокационных станций на частоте 3,5 ГГц.

Моделирование происходило на языке программирования Python версии 3.10.4, в среде разработки PyCharm версии 2023.2.1. Библиотеки, используемые при проведении эксперимента: *numpy*, *tqdm*, *h5py*, *pathlib*, *pandas*, *matplotlib*, *cv2*, *librosa*, *seaborn*. Моделирование происходило на базе операционной системы Windows 10 Pro, сборка операционной системы 19045.2604, характеристики АРМ центральный процессор Intel Core i7–

4771 3.50 ГГц, оперативная память 16 Гб частота работы памяти 2400 МГц, видеокарта NVIDIA GeForce GTX 750 видеопамять 2 Гб, частота работы памяти 5000 МГц частота работы процессора видеокарты 1020 МГц.

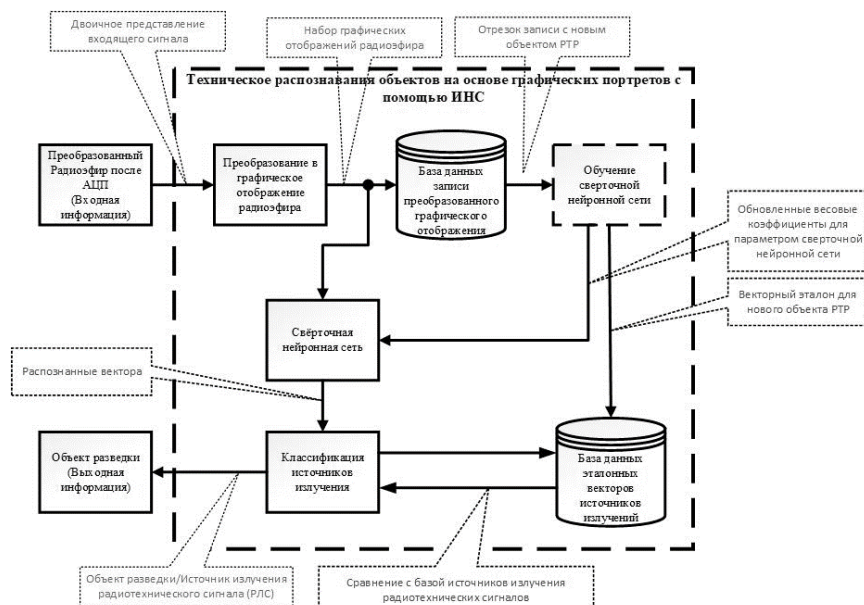


Рис. 4. Концептуальная модель ТРО на основе применения сверточной нейронной сети [13]

Ввиду отсутствия необходимых вычислительных мощностей для обучения нейронной сети был использован метод «переноса обучения» *Transfer Learning* [19], который предполагает перенос части весовых коэффициентов нейронной сети «донора» и дообучение меньшего количества слоев нейронной сети под новые классы распознавания. Такой подход позволил на имеемом компьютере произвести обучение по интересующим данным. Исходной нейронной сетью «донором», стала нейросеть *ResNet – 50*, обученная для 1000 классов на базе данных *ImageNet* [20]. В рамках эксперимента производилось обучение 3 последних слоев нейронной сети.

Параметры обучения сверточной нейронной сети, а также архитектура представлены в табл. 2 [13].

Таблица 2

Характеристики обучения сверточной нейронной сети [13]

№	Параметр обучения сверточной нейронной сети	Значение
1	Архитектура сети	<i>ResNet 50</i> слоев
2	Тип преобразования сигнала в графический портрет	оконное преобразование Фурье
3	Размер входящего преобразованного радиозифра	512*512 пикселей
4	Шаг обучения	20 у.е.
5	Тип функции активации нейрона	<i>ReduceLROnPlateau</i>
6	Количество обучаемых слоев нейронной сети	3 слоя
7	Количество выходных классов	6 шт.
8	Количество примеров для обновления	16 батчей
9	Эпох обучения	20 эпох
10	Тип обучения нейронной сети	<i>Adam</i>
11	Обучающий набор	20 000 ед.
12	Тестовый набор	19 800 ед.

По результатам обучения нейронной сети 6 классам объектов в радиозфире, была получена точность технического распознавания в 92,5% на 15 эпохе обучения, дальнейшее обучение привело к переобученной нейронной сети, которая выражалась в 98% точности распознавания объектов на обучающей выборке и снижением точности классификации тестовой выборки вплоть до 55%. За счет прописанного алгоритма весовые коэффициенты нейронной сети с наилучшими значениями классификации были сохранены [21, 22]. Динамика процесса обучения нейронной сети представлен на рис. 5 [13].

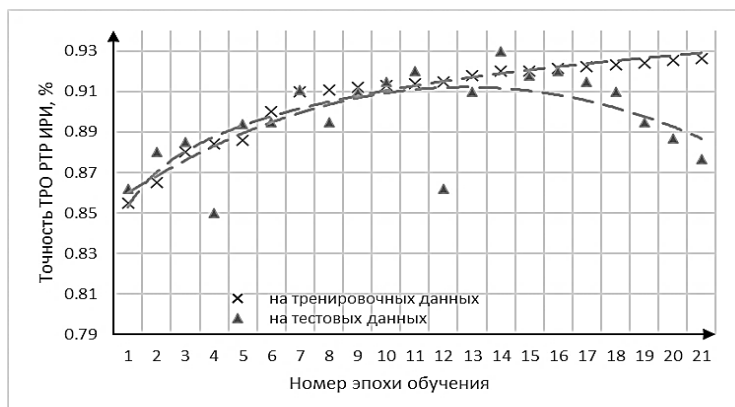


Рис. 5. Результаты обучения нейронной сети [13]

Заключение. В результате проведенного исследования получены следующие основные результаты: разработана модифицированная архитектура сверточной нейронной сети, специально адаптированная для обработки радиосигналов; разработана комплексная методика предобработки данных, включающая преобразование временных рядов в спектральные изображения и нормализацию амплитудных характеристик.

Проведены экспериментальные исследования на различных наборах радиосигналов, включающих: сигналы различных типов радиоэлектронных средств; различные условия помеховой обстановки; разные уровни модуляции. Установлено, что предложенный подход обеспечивает: точность распознавания до 92% при благоприятных условиях; способность к адаптации при изменении характеристик сигналов. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения сверточных нейронных сетей для технического распознавания объектов при радиомониторинге. Дальнейшие исследования целесообразно направить на: расширение набора классов распознаваемых объектов; оптимизацию вычислительных затрат; разработку методов обеспечения робастности при сильных помехах.

Практическая значимость работы определяется возможностью внедрения разработанных методов в существующие системы радиомониторинга для повышения эффективности технического распознавания объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Радиоэлектронная борьба в Вооруженных силах США: военно-теоретический труд. — СПб.: ООО Наукоемкие технологии, 2018. — 131 с.
2. РЛС военного назначения: Всевидящее Око в эпоху информационной войны // Серия углубленных отчетов по информатизации национальной обороны. — 2015. — № 2. — С. 25.
3. Грендер У. Лекции по теории образов. Т. 2. — М.: Мир, 1981. — С. 63-74.
4. Мазуров В.Д. Математические методы распознавания образов: учеб. пособие. — 2-е изд. — Екатеринбург: Урал, 2010. — С. 101-103.
5. Каргашин В.Л. Проблемы обнаружения и идентификации радиосигналов средств негласного контроля // Специальная техника. — 2000. — № 3–5. — С. 45-48.
6. Ильин И.С. Материалы II Конференции «Стратегия развития технологий в области искусственного интеллекта для обеспечения национальной безопасности Российской Федерации» // Искусственный интеллект и направления его развития. Кубинка, 2018. — С. 29-33.

7. Ведыахин А.А., Бурцев М.С., Витяев Е.Е. Сильный искусственный интеллект: на подступах к сверхразуму. – М.: 2021. – С. 205-215.
8. Нейронная сеть // Большая российская энциклопедия. Гл. ред. 5-е изд. – М.: Мир, 2016. – С. 189-196.
9. Зорин А.В. Распознавание лиц на основе нейронных сетей. – 43-е изд. – СПб.: Синергия Наук, 2020. – С. 510-520.
10. Bengio Y., LeCun Y., Hinton G. Deep Learning // *Nature*. – 2015. – No. 521. – P. 436-444.
11. Bengio Y. Foundations and Trends in Machine Learning. – 2nd ed. Vol. 2. // *Learning Deep Architectures for AI* / ed by Bengio Y. – Pekin: Resors, 2009. – P. 1-127.
12. Макаренко С.И. Справочник научных терминов и обозначений. – СПб.: Научное издательство, 2019. – 254 с.
13. Шумков Д.В. Классификация роя неконтролируемых дронов с использованием радиочастот на основе методов машинного обучения в интересах РЭБ // Электронный рецензируемый сборник научных статей по материалам секционного заседания. – Воронеж, 2023. – С. 153-159.
14. Богомолов Л.Ю. Контроль. Диагностика. – 4-е изд. Т. № 4. – СПб.: Мир, 2013. – С. 41-45.
15. Бутырский Е.Ю. Математическое моделирование: монография. – Lambert, Oslo, 2017.
16. Quinlan J.R. Induction of Decision Trees // *Machine Learning*. – 1986. – No. 1. – P. 81-106.
17. Schmidhuber J. Deep Learning in Neural Networks: An Overview. Vol. 61 // *Neural Networks*. – Dalas, 2015. – P. 85-117.
18. Han J., Pei J., Kamber M. Data Mining: Concepts and Techniques. – New York: Elsevier, 2011. – P. 740-742.
19. Song L. Neural Information Processing. – Kentuki: Bangma, 2013. – P. 36-44.
20. Haghighat M., Zonouz S., Abdel-Mottaleb M. CloudID: Trustworthy Cloud-based and Cross-Enterprise Biometric Identification // *Expert Systems with Applications*. – 2015. – Vol. 42, No. 21.
21. Zadeh L. Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing // *Communications of the ACM*. – 2004. – P. 77-84.
22. Glauner P. Deep Convolutional Neural Networks for Smile Recognition (MSc Thesis). – Imperial College London, Department of Computing, 2018. – URL: arXiv.com (дата обращения: 15.03.2023).
23. de Castro, Timmis J. Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach. – Springer, 2002. – P. 57-58.

REFERENCES

1. Radioelektronnaya bor'ba v Vooruzhennykh silakh SShA: voenno-teoreticheskiy trud [Electronic warfare in the US Armed Forces: military-theoretical work]. Saint Petersburg: OOO Naukoemkie tekhnologii, 2018, 131 p.
2. RLS voennogo naznacheniya: Vsevidyashchee Oko v epokhu informatsionnoy voyny [Military radar: The All-seeing Eye in the Age of Information Warfare], *Seriya uglublennykh otchetov po informatizatsii natsional'noy oborony* [A series of in-depth reports on national defense informatization], 2015, No. 2, pp. 25.
3. Grender U. Lektsii po teorii obrazov [Lectures on the theory of images]. Vol. 2. Moscow: Mir, 1981, pp. 63-74.
4. Mazurov V.D. Matematicheskie metody raspoznavaniya obrazov: ucheb. posobie [Mathematical methods of pattern recognition: the training manual]. 2nd ed. Ekaterinburg: Ural, 2010, pp. 101-103.
5. Kargashin V.L. Problemy obnaruzheniya i identifikatsii radiosignalov sredstv neglasnogo kontrolya [Problems of detection and identification of radio signals by means of secret control], *Spetsial'naya tekhnika* [Special equipment], 2000, No. 3–5, pp. 45-48.
6. Il'in I.S. Materialy II Konferentsii «Strategiya razvitiya tekhnologii v oblasti iskusstvennogo intellekta dlya obespecheniya natsional'noy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii» [Proceedings of the Second Conference "Strategy for the development of technologies in the field of artificial intelligence to ensure the national security of the Russian Federation"], *Iskusstvennyy intellekt i napravleniya ego razvitiya* [Artificial intelligence and the directions of its development]. Kubinka, 2018, pp. 29-33.
7. Vedyakhin A.A., Burtsev M.S., Vityaev E.E. Sil'nyy iskusstvennyy intellekt: na podstupakh k sverkhrazumu [Strong artificial intelligence: On the outskirts of superintelligence]. Moscow: 2021, pp. 205-215.
8. Neyronnaya set' [Neural network], *Bol'shaya rossiyskaya entsiklopediya* [The Great Russian Encyclopedia]. Chief editor. 5th ed. Moscow: Mir, 2016, pp. 189-196.
9. Zorin A.V. Raspoznavanie lits na osnove neyronnykh setey [Face recognition based on neural networks]. 43rd ed. Saint Petersburg, 2020, pp. 510-520.
10. Bengio Y., LeCun Y., Hinton G. Deep Learning, *Nature*, 2015, No. 521, pp. 436-444.

11. Bengio Y. Foundations and Trends in Machine Learning. 2nd ed. Vol. 2, *Learning Deep Architectures for AI*, ed by Bengio Y. Pekin: Resors, 2009, pp. 1-127.
12. Makarenko S.I. Spravochnik nauchnykh terminov i oboznacheniy [Handbook of scientific terms and designations]. Saint Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2019, 254 p.
13. Shumkov D.V. Klassifikatsiya roya nekontroliruemyykh dronov s ispol'zovaniem radiochastot na osnove metodov mashinnogo obucheniya v interesakh REB [Classification of swarms of uncontrolled drones using radio frequencies based on machine learning methods in the interests of electronic warfare], *Elektronnyy retsenziruemyy sbornik nauchnykh statey po materialam sektionnogo zasedaniya* [Electronic peer-reviewed collection of scientific articles based on the materials of the breakout session]. Voronezh, 2023, pp. 153-159.
14. Bogomolov L.Yu. Kontrol'. Diagnostika [Control. Diagnostics]. 4th ed. Vol. No. 4. Saint Petersburg: Mir, 2013, pp. 41-45.
15. Butyrskiy E.Yu. Matematicheskoe modelirovanie: monografiya [Mathematical modeling: monograph]. Lambert, Oslo, 2017.
16. Quinlan J.R. Induction of Decision Trees, *Machine Learning*, 1986, No. 1, pp. 81-106.
17. Schmidhuber J. Deep Learning in Neural Networks: An Overview. Vol. 61, *Neural Networks*. Dalas, 2015, pp. 85-117.
18. Han J., Pei J., Kamber M. Data Mining: Concepts and Techniques. New York: Elsevier, 2011, pp. 740-742.
19. Song L. Neural Information Processing. Kentuki: Bangma, 2013, pp. 36-44.
20. Haghighat M., Zonouz S., Abdel-Mottaleb M. CloudID: Trustworthy Cloud-based and Cross-Enterprise Biometric Identification, *Expert Systems with Applications*, 2015, Vol. 42, No. 21.
21. Zadeh L. Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing, *Communications of the ACM*, 2004, pp. 77-84.
22. Glauner P. Deep Convolutional Neural Networks for Smile Recognition (MSc Thesis). Imperial College London, Department of Computing, 2018. Available at: arXiv.com (accessed 15 March 2023).
23. de Castro, Timmis J. Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach. Springer, 2002, pp. 57-58.

Шумков Денис Вадимович – Научно-исследовательский институт оперативно-стратегических исследований ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»; e-mail: 79111111385@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Петергоф, Россия; тел.: +79111111385; адъюнкт.

Титков Илья Васильевич – ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»; e-mail: tiv78@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79213239611; д.т.н.; профессор; зам. начальника кафедры.

Гулевич Павел Александрович – Научно-исследовательский институт оперативно-стратегических исследований ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»; e-mail: Pavelg-m@rambler.ru; г. Санкт-Петербург, Петергоф, Россия; тел.: +78124505079; адъюнкт.

Shumkov Denis Vadimovich – Scientific Research Institute of Operational and Strategic Studies of the Navy of the Russian Academy of Naval Sciences "Naval Academy"; e-mail: 79111111385@yandex.ru; St. Petersburg, Peterhof, Russia; phone: +79111111385; adjunct.

Titkov Ilya Vasilyevich – VUNTS of the Navy "Naval Academy"; e-mail: tiv78@mail.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +78124961618; dr. of eng. sc.; professor; deputy head of the Department.

Gulevich Pavel Alexandrovich – Scientific Research Institute of Operational and Strategic Studies of the Navy VUNTS Navy "Naval Academy"; e-mail: Pavelg-m@rambler.ru; St. Petersburg, Peterhof; phone: +78124505079; adjunct.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

1. Объем статьи должен быть не менее 12 и не более 18 страниц. Формат (А 4). Редактор **Word 7 for Windows**, шрифт Times New Roman, размер 14, интервал 1,5. Авторы представляют в редакцию 1 экз. статьи и идентичный электронный вариант.

2. Названию статьи предшествует индекс УДК, соответствующий заявленной теме.

3. Текст статьи начинается с названия статьи (на русском и английском языках), фамилии, имени и отчества автора (полностью) и снабжается аннотацией на русском и английском языках объемом **не менее 250-300 слов**. В тексте аннотации указывается цель, задачи исследования и краткие выводы. В аннотации **не следует** давать ссылки на номер публикации в списке литературы к статье. После аннотаций приводятся ключевые слова (словосочетания), несущие в тексте основную смысловую нагрузку (на русском и английском языках).

4. В тексте статьи следует использовать минимальное количество таблиц и иллюстраций. Рисунок должен иметь объяснения значений всех компонентов, порядковый номер, название, расположенное под рисунком. В тексте на рисунок дается ссылка. Таблица должна иметь порядковый номер, заголовок, расположенный над ней. Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст. Формулы должны быть набраны **в редакторе формул Word 7 for Windows**.

5. Цитаты тщательно сверяются с первоисточником и визируются автором на обратной стороне последней страницы: "Цитаты и фактический материал сверены". Подпись, дата.

6. Наличие пристатейного библиографического списка на русском и английском языках обязательно. **Ссылок должно быть не менее 20-ти**, из них на зарубежные источники – не менее 35 %. В тексте ссылки должны быть в квадратных скобках.

Примеры оформления литературы: а) для книг: фамилия, инициалы автора(ов), полное название книги, место, год издания, страницы; б) для статей: фамилия и инициалы автора(ов), полное название сборника, книги, газеты, журнала, где опубликована статья, место и год издания (сборника, книги), номер (для журнала), год и дата (для газеты), выпуск, часть (для сборника), страницы, на которых опубликована статья. Иностранная литература оформляется по тем же правилам.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Рукопись должна быть тщательно вычитана. Редакционная коллегия оставляет за собой право при необходимости сокращать статьи, редактировать и отсылать авторам на доработку.

8. Статьи сопровождаются сведениями об авторе(ах) (фамилия, имя, отчество, ученое звание, должность, место работы, адрес, электронный адрес и номер телефона) на русском и английском языках.

9. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Адрес журнала в Интернете: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.