



№2-2026

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 (250). 2026 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); Бородинский 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.; Кравец А.Г.; Куповых Г.В.; Левин И.И.; Магид Е.А.; 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.; Стемпковский 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 29.04. 2026 г. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 26,2. Уч.-изд. л. – 21,7.

Заказ № 10406. 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 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, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

А.Ю. Баранник, А.В. Лагутина, А.А. Лебедев ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ГУМАНИТАРНОМУ РАЗМИНИРОВАНИЮ. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВЗГЛЯДЫ.....	6
В.В. Кудюкин, В.С. Кузьмин ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ РОБОТИЗАЦИИ ДЛЯ РАСФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВОВ НА СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКЕ (ОБЗОР).....	15
Л.А. Рыбак, И.А. Дуюн, В.В. Черкасов, А.А. Волошкин, Т.А. Дуюн РАЗРАБОТКА ЭВРИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ ЛОКАЛЬНОЙ ТРАКТОРИИ БПЛА НА ОСНОВЕ ПАТТЕРНОВ ОГИБАНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ.....	35
А.И. Савельев, А.В. Рябинов, А.В. Семенов МОДЕЛИ БЕСПРОВОДНОГО СЕТЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУППЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ БПЛА.....	45
А.А. Шмидт, В.Р. Бикбулатов, Д.Н. Поляков, А.А. Тхакахов ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ НАЗЕМНО-ВОЗДУШНЫХ РАДИОЛИНИЙ МЕТОДОМ АДАПТИВНОГО ИЗМЕНЕНИЯ МАРШРУТА БПЛА-РЕТРАНСЛЯТОРА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКИ	60
К.Ч. Бжихатлов, И.А. Пшенокова МУЛЬТИАГЕНТНАЯ АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ РЕПРЕЗЕНТАЦИИ СОСТОЯНИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ ДЛЯ АВТОНОМНОГО РОБОТА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....	71
С.М. Соколов, А.А. Богуславский, А.Б. Бугеря, М.А. Ильенков МЕТОД КОНТРОЛЯ ПРОСТРАНСТВА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМОЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ	81
А.А. Кочкаров, А.К. Куликов, В.М. Мацакова УНИВЕРСАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАМКНУТЫМИ АГРОПРОИЗВОДСТВАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ИИ	94

РАЗДЕЛ II. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

А.В. Васильев, И.В. Шардыко, А.Ю. Жуков ОБЩИЕ ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ КОНСТРУКЦИИ И ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ МНОГОСТЕПЕННОГО КОЛЁСНО-ШАГАЮЩЕГО ШАССИ ЛУНОХОДА	106
А.Ю. Коноплин, А.П. Юрманов, А.Ю. Родионов, Р.П. Василенко, М.О. Панчук МЕТОД ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПЕРАТОРА И АНПА, ОСНАЩЕННОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМ КАНАЛОМ СВЯЗИ, ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЦЕЛЕВЫХ ОБЪЕКТОВ	120
В.А. Костюков МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ РОБОТОВ В СЛОЖНЫХ КОНФЛИКТНЫХ СРЕДАХ С ПОЛИГОНАЛЬНЫМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ.....	135
Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев МЕТОДЫ СБОРА ДАННЫХ СРЕДСТВАМИ БПЛА ПРИ МОНИТОРИНГЕ ТРУДНОДОСТУПНОЙ МЕСТНОСТИ	151
В.Д. Матвеев, Д.С. Кобзарь, Я.Д. Лапкин, Р.Р. Богданов, А.С. Изюмов МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕМАНТИКИ ЕСТЕСТВЕННОГО ЯЗЫКА	173

М.Ю. Медведев, В.Х. Пшихопов, А.Р. Гайдук, И.М. Медведев, Е.Ю. Косенко	
МЕТОДЫ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В ЗАДАЧАХ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ.....	185
В.С. Быкова, А.И. Машошин	
АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ НЕОБИТАЕМОМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ ПРИ ПОИСКЕ НАЗНАЧЕННОГО ДОННОГО ОБЪЕКТА ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА ДНА.....	201
РАЗДЕЛ III. СВЯЗЬ, НАВИГАЦИЯ И НАВЕДЕНИЕ	
Н.В. Колесов, А.М. Грузликов, Ю.М. Скородумов, В.С. Тюльников	
ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ МНОГОПУТЕВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ СООБЩЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХМЕРНЫХ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ СЕТЕЙ АНПА	213
А.М. Корсаков, В.В. Иванова	
ОРГАНИЗАЦИЯ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ КОГНИТИВНОГО КАРТИРОВАНИЯ.....	222
В.П. Носков, О.П. Гойдин, А.Н. Курьянов	
ГРУППОВАЯ ВИДЕОНАВИГАЦИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ РОБОТОВ	232
Ф.М. Цеева, Н.Е. Арабов, А.М. Бозиева, З.В. Шомахов	
ЭМУЛЯЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНЫХ ИК- И УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА	241
РАЗДЕЛ IV. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ	
С.Е. Бабин, П.А. Гессен, В.А. Павлова, В.А. Тупиков	
ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕТЕКЦИИ СИАМСКИХ СЕТЕЙ ПРИ ОГРАНИЧЕННОЙ РАЗМЕТКЕ С ОТБОРОМ ТРУДНЫХ ПРИМЕРОВ.....	250
Н.А. Бочаров, К.А. Суминов, М.А. Кирилук, Н.Б. Парамонов	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К УНИФИКАЦИИ СВЯЗУЮЩЕГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОЙ ПЛАТФОРМЫ «ЭЛЬБРУС»	258
И.С. Фомин, А.А. Базельцев	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ КАМЕР КРУГОВОГО ОБЗОРА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА	271
К.И. Морев	
СИСТЕМА СОПОСТАВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТУИЦИОНИСТСКИХ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ	286

CONTENT

SECTION I. PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF ROBOTIC SYSTEMS

A.Yu. Barannik, A.V. Lagutina, A.A. Lebedev JUSTIFICATION OF A COMPLEX OF HUMANITARIAN DEMINING MEASURES. METHODOLOGICAL VIEWS	6
V.V. Kudyukin, V.S. Kuzmin APPLICATION OF ROBOTICS FOR PARALLEL TRAIN BREAK-UP ON AUTOMATED HUMPS (REVIEW)	15
L.A. Rybak, I.A. Duyun, V.V. Cherkasov, A.A. Voloshkin, T.A. Duyun DEVELOPMENT OF HEURISTIC ALGORITHMS FOR OPTIMIZING THE LOCAL TRACTORY OF UAVS BASED ON OBSTACLE AVOIDANCE PATTERNS.....	36
A.I. Saveliev, A.V. Ryabinov, A.V. Semenov MODELS OF SEAMLESS OPERATION OF A GROUP OF AGRICULTURAL UAVS.....	45
A.A. Shmidt, V.R. Bikbulatov, D.N. Polyakov, A.A. Thakahov IMPROVING INTERFERENCE IMMUNITY OF GROUND-TO-AIR RADIO LINKS BY ADAPTIVE ROUTE MODIFICATION OF A UAV RELAY BASED ON INTERFERENCE ENVIRONMENT ANALYSIS	60
K.Ch. Brzhikhatlov, I.A. Pshenokova MULTI-AGENT ARCHITECTURE OF AN ENVIRONMENT REPRESENTATION SYSTEM FOR AN AUTONOMOUS AGRICULTURAL ROBOT	71
S.M. Sokolov, A.A. Boguslavsky, A.B. Bugerya, M.A. Ilienkov METHOD OF SPACE CONTROL BY A DISTRIBUTED VISION SYSTEM.....	81
A.A. Kochkarov, A.K. Kulikov, V.M. Matsakova A UNIVERSAL MODEL OF ADAPTIVE MANAGEMENT OF CLOSED AGRICULTURAL PRODUCTION USING AI TECHNOLOGIES	94

SECTION II. CONTROL AND MODELING SYSTEMS

A.V. Vasiliev, I.V. Shardyko, A.Y. Zhukov DESIGN AND SIMULATING GENERAL APPROACHES OF AN ARTICULATED WHEELED-LEGGED CHASSIS OF THE LUNAR ROVER	106
A.Yu. Konoplin, A.P. Yurmanov, A.Yu. Rodionov, R.P. Vasilenko, M.O. Panchuk METHOD FOR INFORMATION INTERACTION BETWEEN AN OPERATOR AND AN AUV EQUIPPED WITH A HYDROACOUSTIC COMMUNICATION CHANNEL FOR TARGET OBJECT IDENTIFICATION	121
V.A. Kostyukov A METHOD FOR PLANNING ROBOTIC MOVEMENTS IN COMPLEX CONFLICT ENVIRONMENTS WITH POLYGONAL OBSTACLES	136
B.K. Lebedev, O.B. Lebedev METHODS OF DATA COLLECTION BY UAVS WHEN MONITORING HARD-TO-REACH TERRAIN	151
V.D. Matveev, D.S. Kobzar, Ya.D. Lapkin, R.R. Bogdanov A.S. Izyumov A METHOD OF CONTROLLING A MOBILE ROBOT USING NATURAL LANGUAGE SEMANTICS	174
M.Yu. Medvedev, V.Kh. Pshikhopov, A.R. Gaiduk, I.M. Medvedev, E.Yu. Kosenko REINFORCEMENT LEARNING METHODS IN ADAPTIVE CONTROL OF NONLINEAR DYNAMIC OBJECTS	186

V.S. Bykova, A.I. Mashoshin AN ALGORITHM FOR CONTROLLING AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE WHEN SEARCHING FOR A DESIGNATED BOTTOM OBJECT WITH THE INTEGRATED USE OF VARIOUS BOTTOM MONITORING TOOLS.....	202
--	-----

SECTION III. COMMUNICATION, NAVIGATION AND GUIDANCE

N.V. Kolesov, A.M. Gruzlikov, Yu.M. Skorodumov, V.S. Tiulnikov INVESTIGATING MULTIPATH MESSAGE ROUTING ALGORITHMS THROUGH THREE-DIMENSIONAL GRAPH MODELS OF AUV NETWORKS	213
A.M. Korsakov, V.V. Ivanova ORGANIZATION OF MOBILE ROBOTS NAVIGATION BASED ON COGNITIVE MAPPING.....	222
V.P. Noskov, O.P. Goydin, A.N. Kuryanov GROUP VIDEO NAVIGATION OF HETEROGENEOUS ROBOTS	232
F.M. Tseeva, N.E. Arabov, A.M. Bozieva, Z.V. Shomakhov EMULATION OF A TECHNICAL VISION SYSTEM BASED ON VIRTUAL IR AND ULTRASONIC SENSORS FOR MOBILE ROBOT NAVIGATION.....	241

SECTION IV. MACHINE VISION

S.E. Babin, P.A. Gessen, V.A. Pavlova, V.A. Tupikov IMPROVING THE ROBUSTNESS OF SIAMESE NETWORK DETECTION WITH LIMITED ANNOTATION THROUGH HARD EXAMPLE MINING	250
N.A. Bocharov, K.A. Suminov, M.A. Kirilyuk, N.B. Paramonov APPROACHES TO MIDDLEWARE UNIFICATION FOR ROBOTIC SYSTEMS ON THE ELBRUS HARDWARE–SOFTWARE PLATFORM.....	259
I.S. Fomin, A.A. Baseltsev APPLICATION OF A SURROUND-VIEW CAMERA SYSTEM FOR MOBILE ROBOT MOVEMENT SAFETY	272
K.I. Morev IMAGE MATCHING SYSTEM WITH USING INTUITIONISTIC FUZZY SETS.....	286

Раздел I. Перспективы применения робототехнических комплексов

УДК 629.3

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-6-14

А.Ю. Баранник, А.В. Лагутина, А.А. Лебедев

ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ГУМАНИТАРНОМУ РАЗМИНИРОВАНИЮ. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВЗГЛЯДЫ

Необходимость проведения на освобожденных территориях мероприятий по очистке от взрывоопасных предметов потребовала существенного наращивания сил средств, предназначенных для ведения гуманитарного разминирования. Причем особое внимание уделяется увеличению количества высокоэффективных робототехнических средств обеспечивающих возможность поиска и уничтожения взрывоопасных предметов различного типа. Актуальность исследования определяется тем, что в настоящее время в Российской Федерации развернуты активные работы по разработке и производству робототехнических средств способных с разной эффективностью решать данные задачи. При этом во многих случаях данная продукция создается предприятиями, не имеющими необходимого опыта, и следовательно, часто не обеспечивающими требуемого качества работ. Вместе с тем, в связи с увеличением потребности в данных средствах и объемах ассигнований на их производство особую актуальность приобретает необходимость экономического обоснования как направлений их разработки и производства, так и технологий их применения. Исходя из этого были проведены исследования, целью которых являлась разработка подхода, позволяющего оптимизировать распределение финансовых средств при планировании мероприятий по очистке местности от взрывоопасных предметов, определении наиболее эффективных направлений развития средств разминирования, совершенствовании организационно-штатной структуры подразделений, оснащаемых соответствующими робототехническими средствами. В основе такого подхода была положена оценка вероятности выполнения задач по очистке местности от взрывоопасных предметов, выделяемым нарядом сил и средств, а также оценка затрат на выполнение работ входящих в комплекс мероприятий по гуманитарному разминированию с использованием робототехнических средств. Практическая значимость исследования заключается в том, что полученные результаты позволят определить наиболее экономически целесообразные направления развития робототехнических средств гуманитарного разминирования, подготовить предложения по совершенствованию организационно-штатной структуры подразделений, которые будут оснащаться данными средствами.

Средства разминирования; взрывоопасные предметы; робототехнические средства; стоимость; ассигнования.

A.Yu. Barannik, A.V. Lagutina, A.A. Lebedev

JUSTIFICATION OF A COMPLEX OF HUMANITARIAN DEMINING MEASURES. METHODOLOGICAL VIEWS

The need to conduct explosive ordnance clearance operations in liberated territories has necessitated a significant expansion of humanitarian demining capabilities. Particular attention is being paid to increasing the number of highly effective robotic systems capable of searching for and destroying various types of explosive ordnance. The relevance of this study is determined by the fact that the Russian Federation is currently actively developing and producing robotic systems capable of solving these tasks with varying degrees of effectiveness. In many cases, these products are manufactured by companies lacking the necessary experience and, consequently, often failing to deliver the required quality of work. At the same time, the increasing demand for these resources and the increasing funding for their production has made it increasingly important to economically justify both their development and production strategies

and the technologies for their application. Based on this, studies were conducted to develop an approach to optimize the allocation of financial resources when planning explosive ordnance clearance activities, identifying the most effective areas for mine clearance development, and improving the organizational structure of units equipped with the appropriate robotic equipment. This approach was based on an assessment of the likelihood of completing explosive ordnance clearance tasks with the assigned forces and resources, as well as an assessment of the costs of performing work included in a set of humanitarian demining activities using robotic equipment. The practical significance of the study lies in the fact that the obtained results will help identify the most cost-effective development directions for robotic humanitarian demining systems and prepare proposals for improving the organizational structure of units that will be equipped with these systems.

Mine clearance systems; explosive ordnance; robotic systems; cost; appropriations.

1. Введение. Развитие робототехники кардинально изменило возможности подразделений занимающихся очисткой территорий от взрывоопасных предметов (далее – ВОП). Однако прогнозная оценка площади новых территорий Российской Федерации, которая не может быть задействована в экономической деятельности страны в связи с «загрязненностью» ВОП (более 250 тыс. км²) [1–3], позволяет сделать вывод о том, необходимо кратное увеличение производства средств разминирования, а следовательно, и экономическое обоснование направлений развития сил и средств, которые предполагается задействовать в ходе мероприятий по гуманитарному разминированию.

При этом, в ходе разработки робототехнических средств в большинстве случаев первостепенное внимание уделяется вопросам качества выполнения задач по разминированию, обеспечению безопасности ведения работ, надежности, эксплуатационных свойств, технологичности [4].

В тоже время, вопросам экономического анализа формирования направлений развития робототехнических средств разминирования, исследования экономической целесообразности применения различных технологий и методов решения применения этих средств не уделялось должного внимания [4, 5]. Это было связано с тем, закупки подобных средств носили не системный характер и сводились к поставке в подразделения МЧС России единичных образцов.

В основе такого обоснования на наш взгляд должна быть оценка вероятности выполнения задач по очистке местности от взрывоопасных предметов, выделенным нарядом сил и средств, а также оценка затрат на выполнение работ входящих в комплекс мероприятий по гуманитарному разминированию с использованием робототехнических средств траления [6–10].

2. Содержание комплекса мероприятий по гуманитарному разминированию с использованием робототехнических средств траления. Гуманитарное разминирование заключается в поиске идентификации, удалении или уничтожении всех ВОП (включая инженерные мины) и невзорвавшихся боеприпасов из определенного района в пределах определенной глубины залегания¹.

Комплекс мероприятий по гуманитарному разминированию представляет собой очистку от ВОП местности и объектов в целях обеспечения безопасности жизнедеятельности населения. Он предусматривает выполнение следующих основных этапов: поиск ВОП; разминирование; контрольная проверка качества выполнения работ по разминированию.

При выполнении комплекса мероприятий по гуманитарному разминированию с использованием робототехнических средств траления выполняются следующие основные виды работ:

- ♦ поиск ВОП – предполагает действия по выявлению факта наличия (отсутствия) и местонахождения ВОП (сбор, получение, обобщение, анализ, проверка информации и (или) практические работы на местности (объекте);

¹ IMAS 04.10 Второе издание 1 января 2003 г. С учетом поправки 10, февраль 2019 года. Глоссарий терминов, определений и сокращений, используемых в противоминной деятельности.

- ♦ уничтожение ВОП – заключающееся в переводе ВОП в безопасное состояние путем подрыва или механического разрушения;

- ♦ контрольная проверка качества выполнения работ предусматривает проверку очищенного участка ручным способом.

Общая схема работ по гуманитарному разминированию представлена на рис. 1.

Поиск ВОП включает определение наличия, типа и расположения ВОП на местности, места их наибольшего скопления, степени их опасности. В случае обнаружения минных полей (групп мин и т.д.), производится фиксация их границ, координаты, тип используемых боеприпасов, перечень мероприятий по обеспечению безопасности населения.

В общем случае поиск обычно включает несколько процедур: поиск «растяжек»; удаление растительного покрова; поиск ферромагнитных тел и ВОП с использованием приборов поиска, фиксация границ территории, которую необходимо очистить с использованием робототехнических средств траления [11].

Уничтожение ВОП заключается в переводе ВОП в безопасное состояние путем подрыва, сжигания, механического или иного полного, или частичного разрушения.

Машины разминирования, включая робототехнические средства, применяются в основном для уничтожения противопехотных мин. Для уничтожения противотанковых/противопехотных мин используются машины разминирования тяжелого класса [12–15].

Уничтожение ВОП заключается в переводе ВОП в безопасное состояние путем подрыва, сжигания, механического или иного полного, или частичного разрушения.

Машины разминирования, включая робототехнические средства, применяются в основном для уничтожения противопехотных мин. Для уничтожения противотанковых/противопехотных мин используются машины разминирования тяжелого класса.

Этап I Поиск	Этап II Уничтожение	Этап III Контроль
Контрольная проверка местности от Наличия ВОП Сбор информации Техническая разведка Маркировка опасных участков	Поиск отдельных ВОП Уничтожение отдельных ВОП [15] Траление участка с высокой Плотностью ВОП Траление минных полей Очистка от ВОП населенных пунктов и объектов Обеспечение работ по уничтожению ВОП	Качество очистки местности от ВОП Внутренний контроль Внешний контроль Подготовка отчетных документов

Рис. 1. Общая схема организации работ по гуманитарному разминированию

Также робототехнические средства могут применяться для контейнирования отдельных ВОП (с применением полноповоротного захвата) и очистки местности от растительности и подготовки земли для ускорения процесса ручной очистки.

Для повышения безопасности и качества работ по уничтожению ВОП могут применяться беспилотные авиационные системы, оборудованные аппаратурой видеонаблюдения [16, 17].

Контрольная проверка качества выполнения работ проводится с целью обеспечения максимальной безопасности для населения очищенной территории и недопущения присутствия на проверенной территории ВОП массой выше критической.

В группы контроля качества очистки местности входит наиболее подготовленный личный состав пиротехнических подразделений.

В случае если уничтожение ВОП осуществлялось с использованием роботизированных средств траления, контрольной проверке подлежит вся территория, очищенная с помощью роботизированных средств.

3. Целевые функции комплекса мероприятий по гуманитарному разминированию с использованием робототехнических средств траления. Обоснование системы мероприятий по поиску ВОП (рис. 2) проводится путем решения следующей оптимизационной задачи с соответствующей целевой функцией.

Обоснование состава сил и средств выполняющих задачи по поиску ВОП и топологии их применения, при котором вероятность обнаружения будет максимальной при заданных размерах бюджетных ассигнований на проведение мероприятий по гуманитарному разминированию, а также ограничениях по энергетике, совместимости, возможности применения в условиях конкретной местности, погодных условий и т.п.



Рис. 2. Применение беспилотных летательных аппаратов для поиска ВОП:
а – с магнитометром; б – с металлодетектором

$$\begin{cases} P_{\text{обнар}} \cdot \prod_{i=1}^n P_{\text{размин}_i}^{x_i} \rightarrow 1 \\ C_{\text{обнар}} + \sum_{i=1}^n x_i \cdot C_i \leq C_{\text{бюдж}} \end{cases}, \quad (1)$$

где $P_{\text{обнар}}$ – вероятность обнаружения ВОП;

$P_{\text{размин}_i}^{x_i}$ – вероятность разминирования (степень x_i – для средств одного типа);

$C_{\text{обнар}}$ – стоимость средств поиска ВОП или стоимость эксплуатации комплекса за определенный период, руб.;

C_i – стоимость i -того средства разминирования или стоимость эксплуатации средства разминирования за определенный период, руб.;

$C_{\text{бюдж}}$ – размеры бюджетных ассигнований, выделяемых на разминирование, на заданный период времени;

x_i – количество средств противодействия i -того типа;

$i=1, 2, \dots, n$ – номера средств разминирования, удовлетворяющих ограничениям по энергетике, совместимости, возможности применения и др.

Обоснование системы мероприятий по уничтожению ВОП проводится путем решения следующей оптимизационной задачи с соответствующей целевой функцией (рис. 3).

Обоснование такого состава сил и средств уничтожения ВОП и топологии их предотвращённых потерь мирного населения, личного состава и материального ущерба на разминированной территории при заданных размерах бюджетных ассигнований будут максимальными, а также соответствующих ограничениях по энергетике, совместимости, возможности применения в конкретных условиях местности, погодных условий и т.п.:

$$\frac{W_{\text{пред}}^{\text{об}}}{C_{\text{уничтожения}} + C_{\text{контроль}}} \rightarrow \max \quad (2)$$

$$C_{\text{уничтожения}} = C_{\text{поиска}} + \sum_{i=1}^n C_i$$

где $W_{\text{пред}}^{\text{об}}$ – размеры предотвращённых потерь мирного населения, личного состава и материального ущерба;

$C_{\text{уничтожения}}$ – размеры бюджетных ассигнований на уничтожение ВОП на территории, руб.;

$C_{\text{контроль}}$ – размеры бюджетных ассигнований на контрольную проверку территории, руб.;

$$W_{\text{пред}}^{\text{об}} = W_{\text{матер}}^{\text{об}} + \alpha_{\text{сан}}^{\text{об}} \cdot W_{\text{сан}} + \alpha_{\text{безв}}^{\text{об}} \cdot W_{\text{безв}}, \quad (3)$$

где $W_{\text{матер}}^{\text{об}}$ – размеры предотвращённого материального ущерба, руб.;

$W_{\text{сан}}$ – усредненные затраты на восстановление (лечение, реабилитацию) мирного населения и личного состава, попавшего в категорию санитарных потерь, руб.;

$\alpha_{\text{сан}}^{\text{об}}$ – ожидаемое количество предотвращенных санитарных потерь, чел.;

$W_{\text{безв}}$ – экономический эквивалент стоимости человеческой жизни, определяемый, руб.;

$\alpha_{\text{безв}}^{\text{об}}$ – ожидаемое количество предотвращенных безвозвратных потерь, чел.



а



б

Рис. 3. Дистанционно управляемые гусеничные тинные тралы: а – МТ-2; б – МТ-10

При оценке финансовых показателей рассматривают не только средства выделяемые непосредственно на уничтожение ВОП, но и другие расходы, связанные выполнением данной задачи (медицинское обеспечение, затраты на оцепление и охрану района выполнения работ, транспортное обеспечение и т.п.).

Обоснование системы мероприятий по контролю качества выполнения работ по очистке местности от ВОП проводится путем решения следующей оптимизационной задачи (рис. 4).



Рис. 4. Выполнение мероприятий по контролю качества выполнения работ по очистке местности от ВОП

Обоснование состава сил и средств, привлекаемых для контроля качества очистки местности при уничтожении ВОП с использованием роботизированных средств траления, при котором относительные размеры предотвращённых потерь мирного населения, личного состава и материального ущерба на разминированной территории, при заданных размерах

бюджетных ассигнований на проведение мероприятий по гуманитарному разминированию, будут максимальные, а также ограничения по энергетике, совместимости, возможности применения в условиях конкретной местности, погодных условий и т.п.

$$\frac{W_{\text{пред}}^{\text{об}} + W_{\text{пред}}^{\text{терр}}}{C_{\text{обнар}} + C_{\text{уничтожения}} + C_{\text{контроля}}} \rightarrow \max, \quad (4)$$

где $W_{\text{пред}}^{\text{терр}}$ – размеры предотвращённых потерь населения и материального ущерба на прилегающей территории, руб.;

$C_{\text{контроль}}$ – размеры бюджетных ассигнований на контроль качества очистки местности при уничтожении ВОП с использованием роботизированных средств траления руб.;

$$W_{\text{пред}}^{\text{терр}} = W_{\text{матер}}^{\text{терр}} + \alpha_{\text{сан}}^{\text{терр}} \cdot W_{\text{сан}} + \alpha_{\text{безв}}^{\text{терр}} \cdot W_{\text{безв}}, \quad (5)$$

где $W_{\text{матер}}^{\text{терр}}$ – размеры предотвращённого материального ущерба объекта, руб.;

$\alpha_{\text{сан}}^{\text{терр}}$ – ожидаемое количество предотвращенных санитарных потерь населения прилегающей территории, чел.;

$\alpha_{\text{безв}}^{\text{терр}}$ – ожидаемое количество предотвращенных безвозвратных потерь населения прилегающей территории, чел.

Размеры бюджетных ассигнований, выделяемых на контроль качества очистки местности при уничтожении ВОП с использованием роботизированных средств траления, включают финансовые средства, выделяемые непосредственно контроль качества, а также на реализацию других расходов, связанных с выполнением данной задачи (медицинское обеспечение, затраты на оцепление и охрану района выполнения работ, транспортное обеспечение и т.п.).

4. Определение состава сил и средств. Оценка вероятности уничтожения одного ВОП в ходе разминирования с применением робототехнических средств определяется с использованием координатных и параметрических законов поражения и оценки их уязвимости.

Вероятность очистки заданного района будет определяться выражением

$$P_{\text{мп}} = P_{\text{обнар}} \cdot P_{\text{уничтожения}}, \quad (6)$$

где $P_{\text{обнар}}$ – вероятность обнаружения ВОП на заданной территории;

$P_{\text{уничтожения}}$ – вероятность уничтожения ВОП на заданной территории.

Для определения величины $P_{\text{обнар}}$ применяется теория случайных процессов. Для марковских случайных процессов вероятность реализации одного цикла мероприятий по разминированию, в первом приближении может определяться как [18, 19]:

$$P_{\text{обнар}} = \min\{1; (\lambda \cdot S_{\text{ц.с.}}^k + e^{-\lambda \cdot t_{\text{ож}}})^{-1}\}$$

$$\lambda = \frac{1}{S_{\text{ВОП}}}, \quad (7)$$

$$t_{\text{ож}} = \frac{a}{V_{\text{РТК}}},$$

где λ – плотность ВОП, м^{-1} ; $S_{\text{ВОП}}$ – среднее расстояние между ВОП, м; $S_{\text{ц.с.}}^k$ – расстояние между тралящими элементами, м; $t_{\text{ож}}$ – время, выделенное для очистки территории, с; $V_{\text{РТК}}$ – средняя скорость РТК, м/с; a – площадь минного поля, м^2 .

Для немарковских случайных процессов вероятность реализации очистки заданного участка от ВОП определяется имитационным моделированием.

При этом выбор и состав сил и средств обнаружения ВОП для очистки заданной территории выполняется исходя из целевой функции (1). В ней оптимизационная часть связана с перебором показателей с индексом «i». Для сокращения количества указанных переборов может применяться, например, метод динамического программирования (МДП), для чего раскрывается содержание основных формализмов МДП (табл. 1).

Таблица 1

Содержание основных формализмов МДП

№ п/п	Формализмы МДП (по [20])	Содержание формализмов применительно к выбору состава обнаружения ВОП
1	один шаг оптимизации	выбор средства противодействия i -го типа
2	управление на i -ом шаге (U_i)	количество выбранных обнаружения i -го типа, x_i
3	фазовое пространство	$\sum_{i=1}^n C_i$
4	состояние (S)	оставшаяся часть бюджетных ассигнований $C_{\text{бюдж}}$ выделенных на обнаружение ВОП
5	выигрыш на i -м шаге в зависимости от состояния системы S в начале этого шага и управления U_i , $w_i = w_i(S, U_i)$	$\prod_{i=1}^n P_{\text{разминир}_i}^{x_i}$
6	функция, выражающая изменение состояния системы для i -го шага от S к S' под влиянием управления U_i : $S' = \varphi_i(S, U_i)$	$S' = \varphi_i(C_{\text{бюдж}} - x_{i-1} \cdot C_{i-1})$
7	основное функциональное уравнение, выражающее функцию абсолютного выигрыша $W_i(S)$ через $W_{i+1}(S)$: $W_i(S) = \max_{U_i} \{w_i(S, U_i) + W_{i+1}(S')\}$	$W_i(S) = \max \left\{ \prod_{i=1}^n P_{\text{разминир}_i}^{x_i} + P_{\text{разминир}_{i+1}} \cdot \frac{C_{\text{бюдж}} - x_i C_i}{C_{i+1}} \right\}$

В случае получения низких оценок данной вероятности (по мнению лица, принимающего решение) размеры бюджетных ассигнований на обнаружение ВОП увеличиваются и повторно выполняется обоснование комплекса мероприятий активной защиты до тех пор, пока значение вероятности обнаружения ВОП не примет приемлемых размеров.

Заключение. Представленный методический подход к обоснованию системы очистки местности от ВОП с применением робототехнических средств, представляет собой основу для дальнейшего развития и использования в практической деятельности в виде методических рекомендаций операционных стандартов, регламентов и т.п. Их внедрение позволит оптимизировать распределение финансовых средств при планировании мероприятий по очистке местности от ВОП, определении наиболее эффективных направлений совершенствования средств разминирования, совершенствования организационно-штатной структуры подразделений оснащаемых соответствующими робототехническими средствами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Малышев В.П., Азанов С.Н., Виноградов О.В.* Возможные направления совершенствования деятельности органов управления и сил гражданской обороны при проведении гуманитарных операций // Технологии гражданской безопасности. – 2022. – Т. 19. – С. 61-66. (СПЕЦВЫПУСК). – ISSN 1996-8493.
2. *Аюбов Э.Н.* Особенности выполнения задач гражданской обороны в условиях современных вооруженных конфликтов // Технологии гражданской безопасности. – 2023. – Т. 20, № 1 (75) /5. – EDN: BSLHLX ISSN 1996-8493. – DOI: 10.54234/CST.19968493.2023.20.1.75.
3. <https://news.rambler.ru/army/55020788-rossiya-gotovit-samoe-masshtabnoe-gumanitarnoe-razminirovanie-v-istorii/>.
4. *Ершова И.В., Подоляк О.О., Данилов А.В.* Факторы эффективности внедрения робототехнических комплексов на российских предприятиях // News of the Ural State Mining University. – 2018. – 2. – DOI 10.21440/2307-2091-2018-2-130-134.
5. *Миронова Д.Ю., Баранов И.В., Помазкова Е.Е., Румянцева О.Н.* Введение в управление проектной деятельностью: основы формирования, управления и коммерциализации инновационных проектов. – СПб.: Университет ИТМО, 2022. – 89 с.

6. *Korbut K.I., Lavrova O.I.* Analysis of consumer choice features in the digital environment // *Journal of the Belarusian State University. Economics.* – 2025. – 2. – P. 4-14. Russian. – EDN: MQCRIX.
7. <https://www.intechopen.com/chapters/56656#:~:text=Manjula%20Udayanga%20Hemapala,10.5772/intechopen.70246>.
8. *Dorn A.W., Killers E.H.* How can technology help humanitarian demining? // *Stability: International Journal of Security & Development.* – 2019. – 8(1). – P. 1-17. – DOI: 10.5334/sta.743.
9. <https://cyberleninka.ru/article/n/napravleniya-razvitiya-normativnoy-pravovoy-bazy-po-primeneniyu-nazemnyh-robototekhnicheskikh-sredstv-v-chrezvychaynyh-situatsiyah-na>.
10. *Пархомчик Э.А., Пономарев А.И.* Комплексная методика обоснования рациональной группировки сил и средств, привлекаемых для ликвидации чрезвычайной ситуации в военное время // *Научный и образовательные проблемы гражданской защиты.* – 2019. – № 2(41). – С. 61-67.
11. <https://dzen.ru/a/ZrJuglD8CR1yVqSd>.
12. <https://cyberleninka.ru/article/n/o-problemah-primeneniya-robototekhnicheskikh-sredstv-pri-provedenii-razminirovaniya>.
13. *Найденков Д.С., Носков С.С., Полевой Е.В.* Оценка робототехнических средств по техническому уровню при проведении взрывотехнических работ // *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты.* – 2021. – № 3(50). – С. 59-68.
14. https://rusrobotics.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=727:perspektivy-primeneniya-robototekhnicheskikh-sredstv-iz-sostava-mnogofunktsionalnogo-robototekhnicheskogo-kompleksa-kungas-dlya-resheniya-zadach-gumanitarnogo-razminirovaniya&catid=278:obshchie-voprosy&lang=ru-RU.
15. https://www.researchgate.net/publication/370740527_Humanitarian_Demining_Serial-Trackable_Robot_Design_and_Dynamic_Modeling.
16. *Дурнев Р.А., Свиридов Е.В., Маркелов Е.Б.* Перспективная боевая экипировка военнослужащих: проблемы испытаний и комплексной оценки эффективности // *Вооружение и экономика.* – 2025. – Вып. 1.
17. <https://www.intechopen.com/chapters/56737#:~:text=UAV%20for%20Landmine,10.5772/intechopen.69738>.
18. *Венцель Е.С., Грекова И.К.* Столетию со дня рождения. – М.: Юность, 2007.
19. *Дурнев Р.А., Свиридов Е.В., Гусева А.С.* От живучести элементов мини-беспилотных летательных аппаратов к оценке эффективности его поражения: методический подход // *Известия РАРАН.* – 2020. – Вып. 4.
20. *Венцель Е.С.* Исследование операций. – М.: Советское радио, 1972.

REFERENCES

1. *Malyshev V.P., Azanov S.N., Vinogradov O.V.* Vozmozhnye napravleniya sovershenstvovaniya deyatel'nosti organov upravleniya i sil grazhdanskoy oborony pri provedenii humanitarnykh operatsiy [Possible directions for improving the activities of control bodies and civil defense forces during humanitarian operations], *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti* [Civil Security Technologies], 2022, Vol. 19, pp. 61-66. (SPECIAL ISSUE). ISSN 1996-8493.
2. *Ayubov E.N.* Osobennosti vypolneniya zadach grazhdanskoy oborony v usloviyakh sovremennykh vooruzhennykh konfliktov [Features of Performing Civil Defense Tasks in the Context of Modern Armed Conflicts], *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti* [Civil Security Technologies], 2023, Vol. 20, No. 1 (75) /5. EDN: BSLHLX ISSN 1996-8493. DOI: 10.54234/CST.19968493.2023.20.1.75.
3. Available at: <https://news.rambler.ru/army/55020788-rossiya-gotovit-samoe-masshtabnoe-gumanitarnoe-razminirovanie-v-istorii/>.
4. *Ershova I.V., Podolyak O.O., Danilov A.V.* Faktory effektivnosti vnedreniya robototekhnicheskikh kompleksov na rossiyskikh predpriyatiyakh [Factors of efficiency in the implementation of robotic complexes at russian enterprises], *News of the Ural State Mining University*, 2018, 2. DOI 10.21440/2307-2091-2018-2-130-134.
5. *Mironova D.Yu., Baranov I.V., Pomazkova E.E., Rumyantseva O.N.* Vvedenie v upravlenie proektnoy deyatel'nost'yu: osnovy formirovaniya, upravleniya i kommersializatsii innovatsionnykh proektov [Introduction to project management: fundamentals of formation, management, and commercialization of innovative projects]. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2022, 89 p.
6. *Korbut K.I., Lavrova O.I.* Analysis of consumer choice features in the digital environment, *Journal of the Belarusian State University. Economics*, 2025, 2, pp. 4-14. Russian. EDN: MQCRIX.
7. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/56656#:~:text=Manjula%20Udayanga%20Hemapala,10.5772/intechopen.70246>.
8. *Dorn A.W., Killers E.H.* How can technology help humanitarian demining?, *Stability: International Journal of Security & Development*, 2019, 8 (1), pp. 1-17. DOI: 10.5334/sta.743.
9. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/napravleniya-razvitiya-normativnoy-pravovoy-bazy-po-primeneniyu-nazemnyh-robototekhnicheskikh-sredstv-v-chrezvychaynyh-situatsiyah-na>.

10. Parkhomchik E.A., Ponomarev A.I. Kompleksnaya metodika obosnovaniya ratsional'noy gruppировки sil i sredstv, privlekaemykh dlya likvidatsii chrezvychaynoy situatsii v voennoe vremya [Comprehensive methodology for substantiating the rational grouping of forces and means involved in eliminating an emergency situation in wartime], *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoy zashchity* [Scientific and Educational Problems of Civil Defense], 2019, No. 2(41), pp. 61-67.
11. Available at: <https://dzen.ru/a/ZrJugID8CR1yVqSd>.
12. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-problemah-primeneniya-robototekhnicheskikh-sredstv-pri-provedenii-razminirovaniya>.
13. Naydenov D.S., Noskov S.S., Polevoy E.V. Otsenka robototekhnicheskikh sredstv po tekhnicheskomu уровню pri provedenii vzryvotekhnicheskikh rabot [Evaluation of robotic equipment by technical level during explosive works], *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoy zashchity* [Scientific and Educational Problems of Civil Defense], 2021, No. 3(50), pp. 59-68.
14. Available at: https://rusrobotics.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=727;perspektivy-primeneniya-robototekhnicheskikh-sredstv-iz-sostava-mnogofunktsionalnogo-robototekhnicheskogo-kompleksa-kungas-dlya-resheniya-zadach-gumanitarnogo-razminirovaniya&catid=278;obshchie-voprosy&lang=ru-RU.
15. Available at: https://www.researchgate.net/publication/370740527_Humanitarian_Demining_Serial-Track Robot_Design_and_Dynamic_Modeling.
16. Durnev R.A., Sviridok E.V., Markelov E.B. Perspektivnaya boevaya ekipirovka voennosluzhashchikh: problemy ispytaniy i kompleksnoy otsenki effektivnosti [Advanced combat equipment for military personnel: problems of testing and comprehensive evaluation of effectiveness], *Vooruzhenie i ekonomika* [Armament and Economy Magazine], 2025, Issue 1.
17. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/56737#:~:text=UAV%20for%20Landmine,10.5772/intechopen.69738>.
18. Ventsel' E.S., Grekova I.K. Stoletiyu so dnya rozhdeniya [On the centenary of his birth]. Moscow: Yunost', 2007.
19. Durnev R.A., Sviridok E.V., Guseva A.S. Ot zhivuchesti elementov mini-bespilotnykh letatel'nykh apparatov k otsenke effektivnosti ego porazheniya: metodicheskiy podkhod [From the survivability of mini-unmanned aerial vehicle components to assessing their destruction effectiveness: a methodological approach], *Izvestiya RARAN* [Izvestia RARAN], 2020, Issue 4.
20. Ventsel' E.S. Issledovanie operatsiy [Operations research]. Moscow: Sovetskoe radio, 1972.

Баранник Александр Юрьевич – Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр науки и высоких технологий); e-mail: BarannikAU@vniigochs.ru; г. Москва, Россия; к.т.н.; с.н.с.; ведущий научный сотрудник 6 научно-исследовательского центра; SPIN-код – 9462-5588.

Лагутина Анна Викторовна – Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр науки и высоких технологий); e-mail: LagutinaAV@vniigochs.ru; г. Москва, Россия; старший научный сотрудник 62 научно-исследовательского отдела 6 научно-исследовательского центра; SPIN-код – 8104-2764.

Лебедев Андрей Александрович – Всероссийский научно-исследовательский института по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр науки и высоких технологий); e-mail: lebedevaa@vniigochs.ru; г. Москва, Россия; к.в.н.; старший научный сотрудник 62 научно-исследовательского отдела 6 научно-исследовательского центра; SPIN-код – 2907-3706.

Barannik Alexander Yuryevich – All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies of the Ministry of Emergency Situations of Russia (Federal Center of Science and High Technology); e-mail: BarannikAU@vniigochs.ru; Moscow, Russia; cand. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher, Research Center No. 6; SPIN code – 9462-5588.

Lagutina Anna Viktorovna – All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies of the Ministry of Emergency Situations of Russia (Federal Center of Science and High Technology); e-mail: LagutinaAV@vniigochs.ru; Moscow, Russia; senior researcher, Research Department No. 62, Research Center No. 6; SPIN – 8104-2764.

Lebedev Andrey Aleksandrovich – All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies of the Ministry of Emergency Situations of Russia (Federal Center of Science and High Technologies); e-mail: lebedevaa@vniigochs.ru; Moscow, Russia; cand. of mil. sc.; senior researcher, Research Department No. 62, Research Center No. 6; SPIN – 2907-3706.

В.В. Кудюкин, В.С. Кузьмин**ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ РОБОТИЗАЦИИ ДЛЯ РАСФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВОВ НА СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКЕ (ОБЗОР)**

Роботизация технологических процессов на железнодорожном транспорте является одним из приоритетных направлений научно-технической политики Открытого акционерного общества «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД»). Одним из технологических процессов, роботизация которого рассматривается в первую очередь в связи с потребностью повышения перерабатывающей способности железнодорожных станций и снижения числа случаев производственного травматизма, является расформирование составов на сортировочной горке. Цель настоящего исследования – определение уровня техники и формулирование тенденций развития средств роботизации для расформирования составов на сортировочной горке. В рамках исследования использован метод анализа научной и патентной информации. В результате выполнения исследования определены количественные характеристики публикационной активности в рассматриваемой области техники, рассмотрены и систематизированы опубликованные материалы научных и патентных документов. В рамках качественной обработки материалов установлено, что для обеспечения роспуска двух составов при параллельном надвиге, а также для повышения надежности формирования отцепов при наихудших условиях применяются преимущественно решения с двумя независимыми мобильными платформами или двумя манипуляторами на одной раме каретки мобильной платформы. Существенным ограничением для разработки робототехнических комплексов для формирования отцепов является неравномерность длин отцепов. Существенное значение имеет организация взаимодействия с внешними информационными и управляющими системами. Практическая значимость полученных результатов заключается в определении тенденций развития средств роботизации технологических процессов для расформирования составов на сортировочной горке, которые могут быть использованы в дальнейшем для формирования архитектуры перспективного робототехнического комплекса, обеспечивающего повышение перерабатывающей способности и эксплуатационных резервов сортировочной станции за счет тесной интеграции с внешними информационными и управляющими системами.

Цифровая железнодорожная станция; робототехнический комплекс; сортировочная горка; надвиг; расформирование составов; отцеп.

V.V. Kudyukin, V.S. Kuzmin**APPLICATION OF ROBOTICS FOR PARALLEL TRAIN BREAK-UP ON AUTOMATED HUMPS (REVIEW)**

Robotization of technological processes in rail transport is a priority area of scientific and technical policy for Russian Railways. One of the technological processes being prioritized for robotization is train break-up from hump marshalling yards, primarily due to the need to increase station processing capacity and reduce workplace injury rates. The objective of this study is to determine the state of the art and identify development trends for robotic systems used in train break-up from hump operations. The research methodology involved analysis of scientific literature and patent information. As a result of this study, quantitative characteristics of publication activity in this technological area were determined, and materials from scientific and patent documents were reviewed and systematized. During material processing, it was established that solutions predominantly utilize either: two independent mobile platforms or two manipulators mounted on a single mobile platform carriage frame. These configurations are employed to enable parallel break-up of two trains from the hump and to improve the reliability of railcar cut formation under challenging conditions. A significant limitation in developing robotic systems for train break-up from hump operations is the uneven lengths of railcar cuts. Additionally, integration with external information and control systems is of critical importance. The practical significance of the obtained results lies in identifying development trends for robotic automation of train break-up processes from hump operations. These findings can be utilized in future development of promising robotic system architectures that will enhance marshalling yard processing capacity and operational reserves through close integration with external information and control systems.

Digital railway station; robotic complex; hump; move train to hump; train break-up from hump; cut of cars.

Введение. Значительное количество технологических процессов, связанных с железнодорожным транспортом, в частности с организацией грузовых перевозок, требует для своей реализации взаимодействия с железнодорожным подвижным составом. Это необхо-

димо как для определения его текущего технического состояния, так и при обработке составов на станциях в рамках выполнения операций по закреплению или раскреплению, прицепке и отцепке локомотива или групп вагонов, коммерческого и технического осмотров, отпуска тормозов, расформирования на сортировочной горке, завершения формирования, опробования тормозов [1]. Указанные технологические операции выполняются преимущественно вручную, что закономерно приводит к зависимости результатов их реализации и эксплуатационных показателей работы станции от квалификации работника и погодных условий. Кроме того, нахождение работника в т.н. «опасной зоне», т.е. в непосредственной близости от движущегося железнодорожного подвижного состава, увеличивает риск производственного травматизма и требует разработки и применения соответствующих сложных и дорогостоящих технических и организационных решений [2, 3].

С учетом этого автоматизация указанных технологических процессов является одной из наиболее приоритетных задач для отрасли. Ее решение для Открытого акционерного общества «Российские железные дороги» организовано в рамках проекта «Цифровая железнодорожная станция» [4–6]. Ключевым компонентом Цифровой железнодорожной станции, обеспечивающим взаимодействие с элементами железнодорожного подвижного состава при выполнении отдельных технологических операций, являются робототехнические комплексы (далее – РТК) [7–11].

Среди перечня задач по созданию и внедрению робототехнических комплексов в рамках проекта «Цифровая железнодорожная станция», подробное описание которых приводится в работе [12], наибольший интерес представляет роботизация процесса расформирования составов на сортировочных горках, поскольку она требует для своего решения организации взаимодействия с элементами движущегося железнодорожного подвижного состава в сложных условиях. В рамках существующего технологического процесса на горб горки горочным локомотивом надвигается прибывший под расформирование состав. Скорость роспуска состава регулируется в соответствии с параметрами формируемых отцепов. Формирование отцепов осуществляется вручную составителем поездов в соответствии с сортировочным листком, в котором среди прочего указываются сведения о количестве вагонов в каждом отцепе. Для формирования очередного отцепа составитель с использованием специальной вилки или, что значительно реже, с использованием установленного на вагоне расцепного рычага взаимодействует с цепью расцепного привода автосцепного устройства, подлежащего расцепке и находящегося в межвагонном пространстве, в результате чего сначала выключается предохранитель, а затем осуществляется фиксация замка в расцепленном состоянии. Далее сформированный отцеп под действием силы тяжести «отрывается» от надвигаемого состава и начинает самостоятельное движение по спускной части сортировочной горки.

Ручное выполнение операций по взаимодействию с цепью расцепного привода при формировании отцепов является лимитирующим фактором роста перерабатывающей способности сортировочной горки и увеличения соответствующих эксплуатационных резервов [13, 14]. Роботизация этой технологической операции представляет собой достаточно сложную задачу, требующую разработки принципиально новых технических решений, поскольку для повышения перерабатывающей способности сортировочной горки и сортировочной станции в целом требуется не только организовать расформирование составов без участия человека вне зависимости от погодных условий и времени суток, но и увеличить скорость надвигаемого состава, существенно сократив тем самым время на выполнение технологической операции по взаимодействию с цепью расцепного привода в межвагонном пространстве, а также обеспечить работу робототехнического комплекса при выполнении параллельного роспуска.

С учетом вышеизложенного целью настоящего исследования является определение уровня техники и формулирование тенденций развития средств роботизации для расформирования составов на сортировочной горке.

1. Регламент выполнения информационного поиска. Для определения тенденций развития рассматриваемого объекта исследования – средств механизации и автоматизации расформирования движущихся составов, оборудованных автоматически действующими сцепными устройствами (автосцепками) с применением робототехнических комплексов и входящих в их состав компонентов – выполнен информационный поиск в рамках патентного исследования на уровень техники. Методология исследования принята в

соответствии с ГОСТ Р 15.011-2024. Результаты поиска релевантны на 01.02.2026. Глубина поиска выбрана равной 20 годам. Поиск выполнялся с учетом правила 34.1 Договора о патентной кооперации (т.н. минимум РСТ), а также известных особенностей выполнения патентных исследований для железнодорожной отрасли [15].

При формировании поисковых запросов использованы следующие термины на русском и английском языках: расцепление, расцепка, авторасцепка, отцеп, расформирование, роспуск, unhooking, uncoupling car setout, cut of cars, breaking up the train, automatic train shunting, splitting up of train, disengagement, disconnect. При проведении исследования использованы следующие коды универсального десятичного классификатора (УДК): 656.212, 656.25, 681.5, 004.89, 355.691.21 – и индексы Международного патентного классификатора (МПК): B61G 7/00, B61G 7/04, B61G 7/14.

В рамках анализа полученных выборок из результатов, подлежащих непосредственному анализу, исключались технические решения:

- ♦ предполагающие установку дополнительного оборудования на вагоны или непосредственно на автосцепку, например, [16, 17];
- ♦ связанные с расцепкой стоящих составов; наиболее часто подобные решения используются перед вагоноопрокидывателями; примерами могут служить решения, описанные в [18, 19],
- ♦ связанные со средствами расцепки шахтных вагонеток (последние исключались при наличии существенных конструктивных отличий соответствующих сцепных устройств от автосцепок магистрального железнодорожного транспорта).

Кроме того, из анализируемой выборки исключены решения, связанные с винтовыми сцепками, например, [20, 21], а также решения, связанные с предварительной – до начала надвига – установкой автосцепок состава в выключенное положение «на буфер», например, [22].

Следует отметить, что стационарные робототехнические комплексы для расцепки вагонов стоящих составов (перед вагоноопрокидывателями) могут представлять интерес при выполнении самостоятельных исследований в рамках разработки конструкций манипулятора или соответствующей системы управления и контроля, в т.ч. на базе технического зрения.

2. Результаты и их обсуждение. 2.1. Количественная оценка результатов проведенного информационного поиска. В результате выполненного анализа уровня техники были отобраны и проанализированы 35 научных статей и монографий, а также 39 патентных документов. Основные количественные показатели, характеризующие публикационную активность в рассматриваемой области техники, приведены на рис. 1–3.



Рис. 1. Распределение числа опубликованных документов по годам

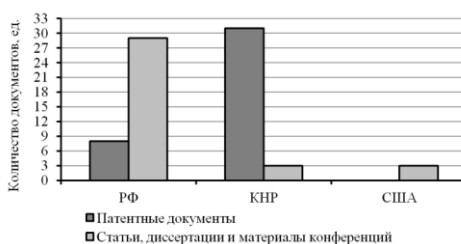


Рис. 2. Распределение числа опубликованных документов по странам

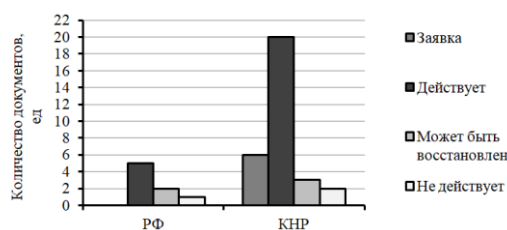


Рис. 3. Распределение числа опубликованных патентных документов по статусу

Полученные количественные характеристики, выражающиеся в росте числа заявляемых и публикуемых патентных документов (основной объем документов опубликован в период с 2018 по 2025 гг.; пик публикационной активности приходится на 2023 год), а также количестве действующих патентных документов (в Российской Федерации – 62,5%, а в Китайской Народной Республике – 64,5% от общего числа опубликованных патентных документов), позволяют утверждать, что рассматриваемая область техники является перспективной, а задача роботизации процесса формирования отцепов в рамках расформирования составов – актуальной.

2.2. Качественная оценка и определение тенденций развития объекта исследования. Общие сведения о принципах построения РТК для расформирования составов на сортировочных горках описаны, в частности, в работах [23–29]. Общие архитектурные решения по роботизации процесса формирования составов на сортировочной горке приводятся в работах [30–32]. О важности реализации устойчивых и безопасных каналов передачи информации для управления робототехническими комплексами говорится в работе [33]. В работе [34] указывается на существенное ограничение при построении РТК, связанное с неравномерностью длин отцепов. Общие сведения о принципах построения систем управления манипулятором для выполнения расформирования составов на сортировочной горке приводятся в работах [35, 36].

Анализ патентной и научной документации показал, что известные и перспективные технические решения различаются между собой по следующему перечню основных характеристик:

- ◆ тип мобильной платформы робототехнического комплекса, включая вариант выполнения направляющей, способ синхронизации скоростей рамы каретки мобильной платформы и надвигаемого состава, а также тип привода рамы каретки мобильной платформы;
- ◆ тип привода манипулятора;
- ◆ способ регистрации факта правильного формирования отцепа;
- ◆ тип источника электроснабжения оборудования, размещаемого на раме каретки мобильной платформы;
- ◆ элемент автосцепного устройства, с которым выполняется взаимодействие манипулятора;
- ◆ наличие внешнего стационарно размещаемого датчика для обнаружения автосцепки, подлежащей расцепке, а также тип средства позиционирования рамы каретки мобильной платформы вдоль надвигаемого состава;
- ◆ наличие и характер информационного взаимодействия с внешними информационными и управляющими системами.

Рассмотрим каждый из признаков в отдельности.

Применение РТК без направляющей с использованием, например, колесной, гусеничной или колесно-гусеничной мобильной платформы [29, 37–40] достаточно редки. В основном для реализации мобильных платформ используют различные типы направляющих, которые размещаются на земле на обочине пути надвига [41–44], в колее железнодорожного пути [45] или же над поверхностью земли [46]. В качестве направляющей может быть использован монорельс [41, 43, 47], в частности Н-образный [48, 49] или изготавливаемый из композитных материалов [50], собственный рельсовый, в т.ч. узкоко-

лейный путь, устанавливаемый на обочине пути надвига [42–45] или внутри колеи пути надвига [51], а также ходовые рельсы самого пути надвига [52]. В последнем случае опорные колеса перемещаются по внутренней грани подошвы рельса, сама каретка движется только внутри колеи, а в транспортировочном положении манипулятор находится вне очертания габарита подвагонных толкателей по ГОСТ 9238. В случае применения монорельса ведущие колеса могут двигаться по земле [53].

Направляющая может быть уложена как на земле [41], так и на собственной эстакаде [43]. Наличие эстакады позволяет располагать манипулятор напротив элемента автосцепного устройства, с которым предполагается обеспечить взаимодействие, что сокращает время на выполнение технологической операции в межвагонном пространстве. В случаях, когда размещение манипулятора не соответствует высоте элементов автосцепного устройства, с которыми осуществляется взаимодействие (в т.ч. в случаях, когда эксплуатируется несколько типов автосцепок с различными конструктивными особенностями выполнения расцепного механизма), для позиционирования манипулятора по высоте осуществляется с использованием отдельного привода [54].

В случае размещения направляющей над поверхностью земли ее выполняют в качестве рельса, на котором закрепляют раму каретки с манипулятором. Для перемещения рамы каретки при этом используют зубчатые рейки [55].

Известно решение [36], в котором манипулятор установлен на колесной мобильной платформе, представляющей собой ящик для хранения манипулятора, снабженный четырьмя колесами для перемещения вдоль состава. Манипулятор установлен на поворотной опорной плите, включающей в себя две наклонные плиты, нижние грани которых могут перемещаться за счет вращения шпильки, приводимой в движение двигателем. За счет этого также возможно регулировать высоту манипулятора относительно автосцепки.

Перемещение каретки в сторону горба горки и синхронизация ее скорости движения со скоростью движения надвигаемого состава может осуществляться, например, за счет механического взаимодействия с элементами последнего вагона формируемого отцепы вдоль его хребтовой балки с использованием специального устройства крепления [45]. Также синхронизация скоростей движения мобильной платформы и надвигаемого состава может достигаться принудительно за счет механической связи с тележкой вагона [56] или за счет балки, контактирующей с торцевой поверхностью вагона, предшествующего формируемому отцепу, в процессе взаимодействия с автосцепным устройством [53, 57]. Однако значительно чаще предлагаются решения, в рамках которых синхронизация достигается за счет управления приводом мобильной платформы по данным от системы технического зрения, как реализовано, например, в [51, 58].

Известны специальные устройства для определения скорости надвигаемого состава, устанавливаемые на каретке мобильной платформы. В частности, в [44, 59] предложено использовать специальный механизм для определения скорости движения надвигаемого состава в виде резинового ролика, прижимаемого к поверхности катания колеса вагона и вращающегося при его движении. Скорость вращения резинового ролика регистрируется с использованием энкодера. Зарегистрированное значение скорости передается в работу управляющему вычислительному комплексу. Там же для определения равенства скоростей движения каретки и надвигаемого состава используется устройство, включающее в себя нейлоновую пластину, касающуюся рамы тележки вагона, предшествующего формируемому отцепу. Регистрация соответствующим энкодером факта поворота нейлоновой пластины на угол в 30 градусов соответствует синхронизации скоростей надвигаемого состава и каретки мобильной платформы. В ряде случаев до момента синхронизации скоростей каретки мобильной платформы и надвигаемого состава используют только ускоренное движение [52].

Для управления движением колесной, гусеничной или колесно-гусеничной мобильной платформы, синхронизации скорости ее движения со скоростью надвигаемого состава и управления манипулятором используют систему восприятия окружающей среды, содержащую лидар, камеру (бинокулярная), GPS-приемник, инерциальный датчик и ультразвуковой датчик [38]. Для обеспечения безопасности персонала такую мобильную платформу оборудуют системой индикации, указывающей направление движения мобильной платформы или сигнализирующей о неподвижности.

Для перемещения каретки мобильной платформы в направлении, противоположном направлению движения надвигаемого состава, может осуществляться за счет электрического привода [45]. Возврат может осуществляться как в начальную ординату (в точку наибольшего удаления каретки мобильной платформы от горба горки), так и в следующую расчетную точку для осуществления ускоренного нагона автосцепки, подлежащей расцепке [52].

Известны решения, согласно которым движение рамы каретки мобильной платформы по направляющей как попутно надвигаемому составу, так и в обратном направлении осуществляется за счет перемещения соединенной с нею гусеничной ленты, которая в свою очередь приводит в движение ведущим колесом от асинхронного электропривода [41]. Следует отметить, что применение асинхронного тягового привода характерно и для оборудованных колесами рам кареток мобильных платформ, перемещающихся по направляющим рельсам [42].

Известны решения, в которых для управления перемещением рамы каретки мобильной платформы используют ременную [54] или зубчато-реечную передачу, шестерня которой связана с асинхронным двигателем, закрепленным на раме каретки [55, 56]. Последний вариант позволяет повысить точность позиционирования каретки относительно надвигаемого состава.

Для случая организации движения рамы каретки мобильной платформы по направляющим рельсам, уложенным на обочине пути надвига, важным является реализация мер по предотвращению опрокидывания робототехнического комплекса при переводе манипулятора из транспортировочного положения в рабочее. В частности, известны решения, в рамках которых каретка оснащена ходовыми колесами, взаимодействующими с поверхностью катания направляющих рельсов, и упорными колесами, взаимодействующими с боковыми поверхностями направляющих [42]. Стопорные и ходовые колеса могут быть выполнены стальными, что позволяет повысить срок их эксплуатации [56]. В случае применения в качестве направляющей только одного рельса для исключения опрокидывания рамы каретки используются два диска, поверхность которых находится в контакте с шейкой рельса [53]. При выполнении монорельса Н-образным поверхность катания ведущих колес перемещается по головке монорельса, а дополнительные зажимные колеса, предотвращающие раскачивание рамы мобильной платформы, перемещаются по подошве монорельса. Дополнительные колеса, упирающиеся в боковые грани головки монорельса, удерживают раму каретки от опрокидывания [48]. При этом Н-образный ходовой монорельс может снабжаться многочисленными ребрами жесткости. В качестве дополнительной меры по защите от опрокидывания для Н-образного монорельса предложено укладывать дополнительный рельс. К раме каретки со стороны дополнительного опорного рельса крепятся кронштейны, на которых закреплены колесо с неподвижной относительно рамы каретки осью вращения, перемещающееся по верхней грани дополнительного опорного рельса, и колесо, прижимаемое пружиной к нижней грани дополнительного опорного рельса [49].

По-разному авторами решается задача выполнения расцепки автосцепных устройств при наихудших условиях, к которым в первую очередь относится наличие в распускаемом составе «коротких» отцепов, состоящих из одного полувагона, длина которого по осям автосцепок составляет 14 м [60]. Достаточно часто применяется несколько кареток мобильной платформы [43, 61]. При этом в некоторых случаях каретки могут иметь специализацию и взаимодействовать с отцепами различной длины по осям автосцепок [62]. В соответствующем устройстве в его составе две каретки: одна предназначена для обработки коротких до 5 вагонов отцепов, вторая для обработки длинных отцепов.

Количество кареток, необходимых для выполнения расформирования состава предлагается определять соотношением между продолжительностью цикла расцепки – временем между стартом очередного цикла расцепки и моментом остановки возвращающейся против движения надвигаемого состава каретки мобильной платформы в ординате начала следующего цикла – и временем между стартом того же цикла выполнения расцепки и моментом подхода очередной автосцепки, подлежащей расцепке, в ординату начала следующего цикла [43].

Возможен вариант реализации робототехнического комплекса при стационарном размещении манипуляторов вдоль пути надвига. В таком варианте для расцепки используются клиновидные расцепные устройства, взаимодействующие с расцепным рычагом автосцепки, поднимающиеся при приближении к ним автосцепки, подлежащей расцепке. По окончании выполнения взаимодействия с расцепным рычагом автосцепки клиновидное расцепное устройство опускается в исходное положение [63].

Для управления манипулятором в проанализированных технических решениях используются различные типы приводов, например, пневматические [42, 64], электрические [65]. Для управления манипулятором с использованием сжатого воздуха чаще всего используют один или несколько специальных электромагнитных клапанов [42]. Электрический привод тем не менее является наиболее предпочтительным, поскольку позволяет построить систему с обратной связью в реальном времени для контроля выполнения взаимодействия с элементами автосцепного устройства, а также позволяет существенно сократить время на выполнение с его помощью технологической операции, включающее в себя время на перевод из транспортировочного положения в рабочее и обратно [65]. Известны решения, в которых манипулятор выполнен телескопическим [66].

Для управления манипулятором и регистрации факта выполнения расцепки часто предлагается использовать систему технического зрения, устанавливаемую на раме каретки мобильной платформы [43, 58, 61, 67]. При этом для определения глубины (расстояния до элементов автосцепного устройства) могут применяться бинокулярные камеры [57]. Для повышения точности работы системы технического зрения предложено использовать методы повышения контрастности и удаления шумов, а также оператор Кэнни для обнаружения границ [6]. Такие решения позволяют выполнять расцепку на скоростях до 7 км/ч [68].

Также предлагаются к применению решения, в которых факт выполнения расцепки регистрируется с использованием стационарного модуля идентификации, в частности камер подсистемы технического зрения [69]. В [70, 71] для регистрации факта формирования отцепа используют сравнение скорости отцепа, получаемой по скоростемеру за горбом горки, и скорости надвига. В случае невыполнения расцепки формируется соответствующее информационное сообщение горчному локомотиву.

Управляющий вычислительный комплекс для управления роботом-расцепщиком в ряде технических решений, в частности в [61], предлагается выполнять резервированным (дублированным). При этом в управляющий вычислительный комплекс предложено интегрировать функции мониторинга технического состояния и оповещения о неисправностях. Дополнительно в техническом решении используют автоматизированное рабочее место для отображения данных о работе комплекса с возможностью ручного управления роботом-расцепителем при возникновении нештатных ситуаций. Для контроля производственной среды робототехнического комплекса, включающей в себя природно-климатические условия (ветер, осадки, глубина снега) установлена система датчиков, в т.ч. датчики счета осей.

Известны и конкретные предложения по организации системы контроля текущего технического состояния робототехнического комплекса, предназначенного для расформирования составов. В соответствующем решении [72] система сенсоров контролирует параметры работы манипулятора (положение, скорость, приложенный крутящий момент). На основе сравнения регистрируемых данных осуществляется обнаружение неисправностей. Данные о работе манипулятора для последующего анализа могут быть представлены облаком точек и сопоставление осуществляется с облаком точек, характерных для исправного состояния комплекса. Для анализа данных также предложено применять кластерный анализ (K-Means, Density-based spatial clustering of applications with noise – DBSCAN). Оценка технического состояния выполняется как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе. Предложены средства по организации предиктивных способов управления нелинейным перемещением РТК [73].

Для обеспечения электроснабжения оборудования, располагаемого на мобильной платформе, могут использоваться контактный рельс [49, 50], аккумуляторные батареи или же источник питания, устанавливаемый непосредственно на раме каретки мобильной платформы.

Следует отметить, что в мировой практике сложилось два подхода к организации процесса расцепления автосцепок. Для отечественных технических решений характерным является взаимодействие с цепью расцепного привода [52, 58], тогда как технические решения, предложенные авторами из Китайской Народной Республики преимущественно направлены на взаимодействие с расцепным рычагом [42, 64, 65, 74–78]. Расцепка при этом выполняется путем вращения разблокированного расцепного рычага автосцепки. Известны решения, взаимодействующие непосредственно с валиком подъемника автосцепки, например, [53].

Основные сложности при реализации соответствующих технических решений в Китайской Народной Республике является наличие нескольких эксплуатируемых типов автосцепок, различающихся между собой конструктивно. Также конструкция автосцепных устройств, эксплуатируемых в настоящее время в Китайской Народной Республике, накладывает дополнительное ограничение на зону выполнения расцепки, поскольку слишком раннее выполнение расцепки может привести к повторному соединению автосцепок, а более позднее не всегда может быть выполнено ввиду существенного ограничения на время выполнения операции – порядка 3–5 секунд [42] при скорости надвига 3–5 км/ч (таким образом дистанция, проходимая кареткой мобильной платформы РТК синхронно с автосцепным устройством, подлежащим расцеплению, составляет всего 8–10 м) [65]. Кроме того, существенное влияние на результаты выполнения взаимодействия с элементами автосцепного устройства оказывает степень износа оборудования и наличие ржавчины, поскольку при взаимодействии с расцепным рычагом у привода манипулятора должна быть предусмотрена возможность подъема расцепного рычага.

Несмотря на приведенные выше сложности, специалисты из КНР предлагают различные варианты выполнения универсальных манипуляторов, которые обеспечивают взаимодействие с любым типом автосцепок, в частности [65]. При этом робот-расцепщик TTG-DG01, обладающей системой технического зрения с временем реакции 100 мс, показывает 98 % эффективности формирования отцепов [79].

Возможность подъема расцепного рычага реализуется, как правило, за счет специального подъемного элемента – например, стержня, устанавливаемого в начале процесса расцепки в контакте с нижней плоскостью расцепного рычага и выводящего его плоскую часть из соответствующего прямоугольного паза фиксирующего кронштейна за счет подъема [64, 74–78]. При этом подъемный элемент стержневого типа и концевой захват (крюк) могут дополнительно снабжаться упругими вставками, обеспечивающими их подвижности при выполнении взаимодействия с расцепным рычагом автосцепки [80]. За счет этого становится возможным предотвратить жесткое соударение элементов манипулятора и расцепного рычага, а также предотвратить резкое увеличение нагрузки на двигатель в случае заклинивания расцепного рычага, возникшего, например, вследствие ржавчины или наледи. Концевой захват может быть закреплен на подвижной опоре устройства линейного привода, способной перемещаться вертикально [46]. Концевой захват может вращаться относительно точки своего закрепления на подвижной опоре. Известно решение [81], в котором оконечное устройство манипулятора для взаимодействия с расцепным рычагом автосцепки содержит две прижимные губки с V-образными канавками. Таким образом присутствует возможность регулирования параметров возврата прижимных губок в исходное состояние.

В отечественном уровне техники имеют место технические решения, направленные на повышение надежности выполнения расцепки при взаимодействии с цепью расцепного привода. Так известны технические решения [51, 82], в рамках которых предполагается выполнить взаимодействие с двумя цепями, одна из которых принадлежит автосцепному устройству последнего вагона формируемого отцепа, а другая – следующему за ним первому вагону следующего отцепа. При этом в [51] при возникновении ошибки в выполнении расцепки предложено формировать сигнал на остановку горочного локомотива и съём нерасцепленных вагонов с надвижной части сортировочной горки для повторения расцепки. В зарубежных решениях также известны варианты с использованием нескольких манипуляторов. Так в [47] модуль линейного перемещения – мобильная

платформа – снабжен двумя платформами для установки на них двух манипуляторов. Первый – короткий – осуществляет взаимодействие с расцепным рычагом автосцепки. Второй – длинный – осуществляет взаимодействие с элементами автосцепки.

Для определения положения мобильной платформы относительно автосцепки надвигаемого состава, подлежащей расцепке, могут применяться устройства счета осей [45, 63, 70]. Дополнительно могут применяться измерители скорости [43]. Известны решения, в которых начало перемещения каретки мобильной платформы осуществляется как по сигналам от внешнего путевого датчика (например, системы технического зрения, камеры которых устанавливаются стационарно, датчика счета осей или коротких рельсовых цепей [63]) или от системы технического зрения, установленной непосредственно на каретке [41]. Для определения параметров движения кареток для нагона автосцепок, подлежащих расцепке, чаще всего применяют устанавливаемую непосредственно на каретке бортовую систему управления [43]. В ряде технических решений, например, в [69], в наиболее удаленной от горба горки границе зоны действия робототехнического комплекса устанавливается модуль идентификации, представляющий собой систему технического зрения, обеспечивающей счет числа проследовавших вагонов, их номера, скорость движения, техническое состояние автосцепного устройства.

Для обнаружения межвагонного пространства с автосцепкой, подлежащей расцепке, могут применяться лидары. Так известны решения, в рамках которых предложено использовать систему из двух лидаров [44, 59]. При обнаружении проследования межвагонного пространства с автосцепкой, подлежащей расцепке, мобильная платформа приводится в движение. На базе применения лидара, размещаемого на базе мобильной платформы, также возможно реализовать систему подсчета числа вагонов, проследовавших мимо каретки мобильной платформы, что используется для управления перемещением РТК [48].

Известны различные подходы к организации информационного взаимодействия с внешними информационными и управляющими системами. В рамках одного технического решения [69] осуществляется управление горочным локомотивом: по первому целевому сигналу осуществляется движение на путь, занимаемый составом, готовым к роспуску. Далее – после успешной прицепки к составу – формируется второй целевой сигнал. По третьему целевому сигналу разрешается выполнять надвиг состава на сортировочную горку. При совпадении данных о надвигаемом составе от модуля идентификации с данными программы роспуска, формируется четвертый целевой сигнал на управление мобильной платформой РТК. В случае успешной расцепки формируется сигнал на движение горочного локомотива назад в парк прибытия.

В другом техническом решении, предложенном специалистами из Китайской Народной Республики сведения о параметрах отцепов поступают из станционной информационно-управляющей системы сортировочной станции (DCD-TH). Ожидаемое расположение автосцепки, подлежащей расцепке, получают из системы контроля расформирования составов на сортировочной горке (AITG). Значения скорости надвигаемого состава получают из системы сигнализации и мониторинга маневровых локомотивов (STP) [71].

В отечественном техническом решении, описанном в [82–84], информация о параметрах движения надвигаемого состава поступает из подсистемы горочной автоматической локомотивной сигнализации с передачей информации по радиоканалу (ГАЛС Р).

3. Тенденции развития средств роботизации для расформирования составов на сортировочных горках. С учетом вышеизложенного возможно сформулировать следующие тенденции развития технических средств в области расформирования составов на сортировочных горках:

- ♦ интеграция с внешними информационными и управляющими системами, в т.ч. с системами управления горочным локомотивом, для определения параметров надвигаемого состава и параметров формируемых отцепов, а также для сигнализирования о возникновении ошибок при формировании отцепов;
- ♦ применение мобильной платформы, направляющая которой размещается у поверхности земли на обочине пути надвига;

- ♦ применение асинхронного тягового привода для приведения в движение мобильной платформы как в направлении, совпадающем с направлением движения надвигаемого состава, так и в противоположном;
- ♦ применение стационарных датчиков на основе технического зрения, а также датчиков счета осей для определения пространственных координат автосцепов, подлежащих расцепке, в надвигаемом составе;
- ♦ обеспечение контроля технического состояния автосцепного устройства перед началом выполнения технологической операции по формированию очередного отцепа;
- ♦ применение подсистемы технического зрения, камеры которой размещаются непосредственно на каретке мобильной платформы для обнаружения автосцепки, подлежащей расцепке, управления процессом синхронизации скоростей движения каретки мобильной платформы и надвигаемого состава, позиционирования манипулятора и контроля выполнения с его помощью операции по формированию очередного отцепа; применение бинокулярных камер или лидаров для определения глубины;
- ♦ применение электрического привода манипулятора для снижения времени выполнения технологической операции по взаимодействию с цепью расцепного привода автосцепного устройства, а также автоматизации контроля результатов выполнения такого взаимодействия;
- ♦ применение средств диагностики для определения текущего технического состояния РТК.

Заключение. В результате выполнения исследования определен уровень техники и сформулированы тенденции развития средств роботизации для расформирования составов на сортировочной горке. Получены следующие основные результаты:

1. Подтверждена актуальность задачи разработки робототехнических комплексов для расформирования составов на сортировочных горках. Установлено, что лидирующими странами в области разработки и внедрения роботизированных решений для расформирования составов на сортировочной горке являются Российская Федерация и Китайская Народная Республика.

2. Установлено, что концепции построения РТК в нашей стране и в Китайской Народной Республике существенно различаются. Отличие заключается в том, что отечественные решения направлены на организацию взаимодействия с цепью расцепного привода, в то время как решения из КНР предлагают организовать взаимодействие манипулятора с расцепным рычагом, что существенно усложняет механику выполнения расцепления.

3. Обобщен мировой опыт в области построения средств роботизации технологических процессов для расформирования составов на сортировочной горке. Установлена необходимость тесной интеграции с внешними информационными и управляющими системами для обеспечения повышения перерабатывающей способности сортировочной горки и сортировочной станции в целом.

Научная новизна полученных результатов исследования заключается в систематизации научных, технических и технологических решений в области роботизации технологического процесса расформирования железнодорожных составов на сортировочных горках.

Практическая значимость результатов исследования заключается в формировании научного обоснования для разработки концептуального проекта перспективного робототехнического комплекса для расформирования составов на сортировочной горке, позволяющего увеличить эксплуатационные резервы за счет увеличения скорости надвигаемого состава, а также обеспечения работы комплекса технических средств при выполнении параллельного роспуска.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Долгий А.И. Технологии интенсивного развития ОАО «РЖД» – эффективный ответ на современные вызовы // Железнодорожный транспорт. – 2025. – № 7. – С. 6-15. – EDN EUZNIJ.
2. Антонов А.А., Кузьмин В.С., Цыбанов И.А. Развитие технических средств для снижения производственного травматизма // Автоматика, связь, информатика. – 2022. – № 11. – С. 31-34. – DOI 10.34649/AT.2022.11.11.005. – EDN FLOCTZ.

3. Boddiford A.S. Improving the safety and efficiency of rail yard operations using robotics: дис. – 2013.
4. Долгий А.И. Цифровая железнодорожная станция как ключевой элемент повышения эффективности перевозочного процесса // Железнодорожный транспорт. – 2025. – № 9. – С. 7-11. – EDN GNMNAG.
5. Андреев В.Е., Долгий А.И., Кудюкин В.В., Хатламаджиян А.Е., Гришаев С.Ю., Ольгейзер И.А. Цифровая железнодорожная станция - от концепции к реальному внедрению // Автоматика, связь, информатика. – 2023. – № 9. – С. 2-6. – DOI 10.34649/AT.2023.9.9.001. – EDN WYCVAE.
6. Назимова С.А. ЦЖС: новая модель управления // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 8. – С. 15-17. – EDN JHHQNA.
7. Андреев В.Е. Трансформация производственных процессов в эпоху цифровых технологий // Железнодорожный транспорт. – 2025. – № 9. – С. 4-6. – EDN NNZRPX.
8. Кудюкин В.В., Тарасов К.А., Чупахин Д.П. Робототехнический комплекс - компонент цифровой железнодорожной станции // Автоматика, связь, информатика. – 2023. – № 8. – С. 10-14. – DOI 10.34649/AT.2023.8.8.002. – EDN QYICSY.
9. Бочков А.В. Обзор заседаний секций научно-технического совета АО «НИИАС» в первом полугодии 2025 года // Интеллектуальный транспорт. – 2025. – Т. 9, № 2 (34). – С. 4-29. – EDN UIMKIG.
10. Долгий А.И., Хатламаджиян А.Е., Озеров А.В., Бочков А.В. Роботизация на железнодорожном транспорте // Интеллектуальный транспорт. – 2025. – Т. 9, № 3 (35). – С. 4-32. – EDN JCBFIE.
11. Долгий А.И. Концептуальный подход к построению современной платформы управления перевозочным процессом в ОАО «РЖД» // Тр. АО «НИИАС»: Сб. статей. Т. 1. Вып. 11. – М.: Типография АО «Т 8 Издательские Технологии», 2021. – С. 9-31. – EDN LCXFHD.
12. Хатламаджиян А.Е., Соколов В.Н., Ольгейзер И.А., Золотарев Ю.Ф. Развитие комплекса системобразующих технических решений цифровой станции // Тр. АО «НИИАС»: Сб. статей. Т. 2. Вып. 11. – М.: Типография АО «Т 8 Издательские Технологии», 2021. – С. 26-37. – EDN QPHIMZ.
13. Кудюкин В.В. Роботизация как необходимый элемент повышения эффективности процесса железнодорожных перевозок // Транспорт Российской Федерации. – 2023. – № 1-2(104-105). – С. 13-16. – EDN OZWXSU.
14. Сотников Е. А., Шенфельд К. П. Четвёртая промышленная революция и её влияние на железные дороги // Мир транспорта. – 2022. – Т. 20, № 6 (103). – С. 6-13. – DOI 10.30932/1992-3252-2022-20-6-1. – EDN IEECTN.
15. Розенберг Е.Н., Раков В.В., Вихрова Н.Ю. Цели и задачи проведения патентных исследований при разработке железнодорожной техники // Тр. АО «НИИАС»: Сб. статей. Т. 2. Вып. 11. – М.: Типография АО «Т 8 Издательские Технологии», 2021. – С. 287-297. – EDN DSTQKN.
16. Патент № 112455492 А Китайская Народная Республика, МПК B61G 7/14. Unhooking and hooking device and control method thereof: 202011455498.2 : заявл. 10.12.2020; опубл. 09.03.2021 / Xie Xiaoyang, Zhang Zhiyong, Wei Feng, Zhang Gendong, Ren Liangyin, Luo Genyuan, Cui Yubo; заявитель Chongqing Cisaitech. Artificial Intelligence Technology Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN320827770> (дата обращения: 04.02.2026).
17. Патент № 120681188 А Китайская Народная Республика, МПК B61G 7/04, B61K 11/00. Railway hump hook lifting operation robot system and method: 202510828674.9: заявл. 20.06.2025; опубл. 23.09.2025 / Zhang Xuesong, Tan Ligang, Zang Yongli, Li Gang, Feng Jun, Zhang Xiaoqiang, Ren Jianzhong, Fu Wei, Song Yu, Yang Huachang, Zhang Xiaodong, Jiang Yuanhua, Zhang Liang, Liu Qing, Li Pide, Wang Wei, Zhai Ke, Wo Huaou, Liu Zhenghua, Yu Huai, Bao Xiaoyue, Xu Zhanying, Jin Xin, Luan Dejie, Gan Lu, Jiang Lu, Hou Xiaopeng, Su Yangping, Wang Jing, Ye Chunsheng, Wang Hongjia, Sun Haiyang, Tian Yu, Wang Zhenhong, Xu Yongmei, Jiang Jilei, Duan Yunjie, Hu Qiang, Gong Liang, Xu Wan'an, Li Bing, Xie Liang, Liu Wu, Bai Peng, Liu Pengfei, Wu Cuiya, Bai Pengfei, Li Ruichen, Tang Huidong, Ren Wanxing, Cao Ziyu, Han Bo; заявитель China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd., China State Railway Group Co., Ltd., Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Communication and Signaling Research Institute of China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN464967183> (дата обращения: 04.02.2026).
18. Патент № 118683589 А Китайская Народная Республика, МПК B61G 7/04. Universal train intelligent unhooking and rehooking system and method: 202410831562.4: заявл. 26.06.2024; опубл. 24.09.2024 / Yang Guoqing; заявитель Hubei Huadian Jiangling Power Generation Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN440603928> (дата обращения: 04.02.2026).
19. Патент № 115571185 В Китайская Народная Республика, МПК B61G 7/04. Automatic unhooking device for open wagon and working method: 202211211221.4: заявл. 30.09.2022; опубл. 06.01.2023 / Wang Guofeng, Zhang Guangyuan, Wang Junyan, He Yusheng; заявитель Shandong Jiaotong University. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN389993469> (дата обращения: 04.02.2026).

20. Патент № 3095666 B1 Европейское патентное ведомство, МПК B61G 7/04. Device for uncoupling an elongated screw coupling: 16166741: заявл. 22.04.2016: опубл. 23.11.2016 / Harrer Patrick, Hattinger Mathias, Pachler Martin, Zellner Christoph, Egger Martin, Stadlmann Burkhard, Zauner Gerald; заявитель Fh Ooe Forschungs & Entw Gmbh. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/ru/detail.jsf?docId=EP179901459> (дата обращения: 04.02.2026).
21. Salger P., Jost F., Gratzfeld P. Autonomous Coupling System for Goods Rail Traffic a robotic solution for marshalling yards handling hook-and-chain couplings // 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). – IEEE, 2018. – P. 443–448.
22. Патент № 4594154 A1 Европейское патентное ведомство, МПК B61G 7/00, B61G 3/20, B61J 3/02, B61L 15/00, B61L 25/02, B61L 25/04. Method for disassembling and reassembling a train, automatic train coupling, and train: 23777166: заявл. 20.09.2023 : опубл. 06.08.2025 / Theilacker Robert, Kolshorn Kay Uwe; заявитель Voith Patent Gmbh. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/ru/detail.jsf?docId=EP460453143> (дата обращения: 04.02.2026).
23. Махутов Н.А., Розенберг Е.Н., Андреев В. Е. [и др.]. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты: Обеспечение функциональной безопасности железнодорожного транспорта. – М.: АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», 2024. – 504 с. – EDN BNHJQV.
24. РЖД начали использовать робот-манипулятор, который занимается расцепкой вагонов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2023. – № 4-6. – С. 41. – EDN FIWRSO.
25. Кудюкин В.В., Озеров А.В. Векторы цифровой трансформации железных дорог // Наука и технологии железных дорог. – 2023. – Т. 7, № 4 (28). – С. 18-24. – EDN SBPFZO.
26. Кудюкин В. В., Дудоров Е. А., Вукотов А. В., Котова К. А. Роботизация как элемент цифровой трансформации // Железнодорожный транспорт. – 2022. – № 5. – С. 19-23. – EDN NMAETQ.
27. Автоматизация работ в перегрузочных терминалах // Железные дороги мира. – 2015. – № 8. – С. 15-18. – EDN UBEDGP.
28. Shabelnikov A.N. Railway Sorting Robotics // In: Proceedings of the Fourth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’19). IITI 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 1156. – Springer, Cham, 2020. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-50097-9_63.
29. Tan H., et al. An Integrated Robotic System for Autonomous Brake Bleeding in Rail Yards // International Conference on Intelligent Autonomous Systems. – Cham: Springer International Publishing, 2016. – P. 157-173.
30. Дудоров Е.А., Кудюкин В.В., Котова К.А. Робототехнические комплексы обслуживания подвижного состава российских железных дорог // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 9 (750). – С. 3-15. – DOI 10.18698/0536-1044-2022-9-3-15. – EDN OANIVQ.
31. Дудоров Е.А., Котова К.А., Кудюкин В.В., Жиденко И.Г. Робототехнические комплексы для обслуживания подвижного состава // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2022. – № 1 (57). – С. 50-55. – EDN LGULAX.
32. Охотников А.Л., Зажигалкин А.В. Обзор ключевых технологий робототехники // Проблемы искусственного интеллекта. – 2025. – № 1 (36). – С. 141-155. – DOI 10.24412/2413-7383-141-155. – EDN YRDWLG.
33. Кудюкин В.В., Кукушкин С.С., Хакиев З.Б. Создание устойчивых и безопасных каналов передачи информации для управления робототехническими комплексами // Тр. АО «НИИАС»: Сб. статей. Т. 2. Вып. 11. – М.: Типография АО «Т 8 Издательские Технологии», 2021. – С. 209-215. – EDN KSPUUD.
34. Калинин А.В., Долганюк С.И., Савицкий А.Г. К вопросу построения системы управления технологическим процессом Цифровой станции // Тр. АО «НИИАС»: Сб. статей. Т. 2. Вып. 11. – М.: Типография АО «Т 8 Издательские Технологии», 2021. – С. 9-25. – EDN HRSUOA.
35. Дудоров Е.А., Котова К.А. Система управления манипулятором робототехнического комплекса для обслуживания механизмов сцепки и тормозной системы железнодорожных вагонов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2021. – Т. 12, № 1. – С. 58-64. – EDN YMSRJQ.
36. Kotova K., Dudorov E. and Kudyukin V. Manipulator Control System for Railroad Transport Coupling and Braking System Maintenance // 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation, 2021. – P. 601-605. – doi: 10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537477.
37. Патент № 118343181 В Китайская Народная Республика, МПК B61G 7/04. Train unhooking robot and unhooking method: 202410642095.0: заявл. 23.05.2024: опубл. 16.07.2024 / Pei Chuanfu, Zhai Zhiyuan, Cheng Gong, Jiang Zhigang, Zhang Chunyu, Lu Ping, Meng Fanguang, Wu Wei, Wu Wenliang, Zhang Daorui; заявитель Huaneng Qinbei Power Generation Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN436449050> (дата обращения: 04.02.2026).

38. Патент № 113894765 А Китайская Народная Республика, МПК В25J 5/00, В25J 11/00, В61G 7/04. Automatic train unhooking robot and system: 202111136599.8: заявл. 27.09.2021: опубл. 07.01.2022 / Yang Guodong, Guo Renjie, Tian Yunong, Long Xiaoyu, Zhang Yanfeng, Li En, Li Zhishuo, Jing Fengshui, Liang Zize, Tan Min; заявитель Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN348114972> (дата обращения: 04.02.2026).
39. Yao J. *et al.* Design and its characteristic analysis of a wheeled train uncoupling robot with multi-degrees-of-freedom // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2016. – Vol. 230. – I. 10. – P. 1673-1684.
40. Yao J. *et al.* Position and orientation error analysis and its compensation for a wheeled train uncoupling robot with four degrees-of-freedom // IET Intelligent Transport Systems. – 2015. – Vol. 9. – I. 2. – P. 156-166.
41. Патент № 2834370 С1 Российская Федерация, МПК В61G 7/04. Способ перемещения мобильной платформы робототехнического комплекса, предназначенного для роспуска железнодорожного подвижного состава на сортировочной горке: 2024113433: заявл. 17.05.2024: опубл. 06.02.2025 / Баранов А.И., Вукотов А.В., Соколова И.В., Хакиев З.Б., Кузьмин В.С.; заявитель Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». – URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2834370&TypeFile=html (дата обращения: 04.02.2026).
42. Патент № 211617712 U Китайская Народная Республика, МПК В61G 7/04. Unhooking robot system for railway hump operation : 201922371071.3 : заявл. 26.12.2019 : опубл. 02.10.2020 / Zhang Xiaoqiang, Ma Yukun, An Di, Hu Gan, Li Kejia, Bao Lukun, Che Dehui, Zhang Liang, Zhang Defu, Ren Jianzhong, Li Yang, Ma Bin, Yu Wang, Yang Lin, Zhao Qingyu, Yang Guangwei; заявитель China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Institute of Transport and Economics, Shenyang Quickhigh Robot Application Technology Co., Ltd., China Railway Shenyang Group Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN308421034> (дата обращения: 04.02.2026).
43. Патент № 2450946 С1 Российская Федерация, МПК В61G 7/04. Система авторасцепки вагонов на сортировочной горке: 2010151130/11: заявл. 14.12.2010 : опубл. 20.05.2012 / Свердлов В.Б., Акмалов С.Г., Иргер Г.Ю.; заявитель Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». – URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2450946&TypeFile=html (дата обращения: 04.02.2026).
44. Патент № 113428186 В Китайская Народная Республика, МПК В61G 7/04. Railway hump operation robot train speed sharing device: 202110826519.5: заявл. 21.07.2021: опубл. 24.09.2021 / Deng Pingping, Yu Wang, Wang Chen, Zhang Dehua; заявитель Shenyang Qihui Robot Application Technology Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN338610815> (дата обращения: 04.02.2026).
45. Патент № 208715207 U Китайская Народная Республика, МПК В61G 7/00, В61G 7/04. Be applied to automatically unhook equipment that railway freight car breaks off relations: 201821190383.3: заявл. 25.07.2018: опубл. 09.04.2019 / Sun Kai; заявитель Sun Kai. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN241361309> (дата обращения: 04.02.2026).
46. Патент № 219584182 U Китайская Народная Республика, МПК В61G 7/04. Unhooking device and system: 202320871248.X: заявл. 18.04.2023: опубл. 25.08.2023 / Feng Bin, Zhang Aimin, Zhang Ye, Sun Linfeng, Xie Yingchun, Tang Fei, Hu Xiaodong, Li Kun, Li Wei, Li Runqiang; заявитель Shaanxi Yuheng Railway Co., Ltd., Sichuan Guoruan Science & Technology Group Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN406567207> (дата обращения: 04.02.2026).
47. Патент № 113942539 В Китайская Народная Республика, МПК В61G 7/04. Decoupling and re-hooking robot and decoupling and hooking operation method thereof: 202110496954.6: заявл. 07.05.2021: опубл. 18.01.2022 / Huang Shuguang, Yang Xinhang, Wang Rugui, Yang Tao, Yao Xin; заявитель Proliance Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN349223109> (дата обращения: 04.02.2026).
48. Патент № 113844488 А Китайская Народная Республика, МПК В61G 7/04, В61D 15/00. Railway hump operation lifting hook walking device: 202110837847.5: заявл. 12.11.2021: опубл. 28.12.2021 / Wang Chen, Yu Wang, Deng Pingping, Zhang Dehua; заявитель Shenyang Qihui Robot Application Technology Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN346980478> (дата обращения: 04.02.2026).
49. Патент № 119017354 В Китайская Народная Республика, МПК В25J 5/02, В25J 15/00, В25J 19/02, В25J 9/00, В25J 9/04, В61G 7/04. Hook lifting robot for railway hump operation: 202411496212.3: заявл. 25.10.2024: опубл. 26.11.2024 / Yu Wang, Hou Wenqi, Liu Xiaolei, Deng Pingping, Li Shuai, Liu Fuwang, Bai Xiaoshuang, Fu Yukun, Zhang Chunlei, Yang Dawei, Sun Jianbo, He Tao, Zhao Qing; заявитель Shenyang Quickhigh Robot Application Technology Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN443852489> (дата обращения: 04.02.2026).

50. Патент № 120921331 А Китайская Народная Республика, МПК B25J 5/02, B25J 9/00, B25J 15/00, B25J 17/00, B25J 19/00. Hump operation lifting hook robot: 202511189841.6: заявл. 25.08.2025: опубл. 11.11.2025 / Yu Wang, Xia Guanxi, Su Zhefeng, Li Yingbo, Tian Chenming, Feng Rui, Sun Tao, Hu Ying; заявитель Shenyang Qihui Robotics Application Technology Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN468572793> (дата обращения: 04.02.2026).
51. Патент № 216043 U1 Российская Федерация, МПК B61G 7/04. Устройство автоматического расцепления вагонов: 2022128548: заявл. 02.11.2022: опубл. 16.01.2023 / Сергеев А.А., Заец А.А., Дубовицкий А.В., Буровских Д.В., Шишкович А.Д.; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева» Министерства обороны Российской Федерации. – URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=216043&TypeFile=html (дата обращения: 04.02.2026).
52. Патент № 2728968 C1 Российская Федерация, МПК B61G 7/04. Способ автоматического расцепления автосцепок движущихся вагонов и устройство его осуществления: 2019132718: заявл. 16.10.2019: опубл. 03.08.2020 / Зайков В.Н.; заявитель Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». – URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2728968&TypeFile=html (дата обращения: 04.02.2026).
53. Патент № 2700208 C1 Российская Федерация, МПК B61G 7/04. Устройство для автоматического расцепления вагонов движущихся поездов: 2018140628: заявл. 19.11.2018 : опубл. 13.09.2019 / Панин Ю.А., Матях Д.И.; заявитель Акционерное общество Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (АО «ВНИКИ»). – URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2700208&TypeFile=html (дата обращения: 04.02.2026).
54. Патент № 102616247 В Китайская Народная Республика, МПК B61G 7/04, B25J 5/02. Train unhooking robot: 201210081425.0: заявл. 26.03.2012 : опубл. 01.08.2012 / Yao Jianjun, Jiang Guilin, Di Duotao, Li Qiyue, Deng Kunxiu, Wang Hongguang, Wang Maolin, Li Shaoyuan, Ye Xiaohong; заявитель Harbin Engineering University. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN85249970> (дата обращения: 04.02.2026).
55. Патент № 109940580 В Китайская Народная Республика, МПК B25J 5/02, B25J 9/12, B25J 18/00, B61G 7/04. Frame-type railway unhooking manipulator: 201910242291.8: заявл. 28.03.2019: опубл. 28.06.2019 / Guo Zhongfeng, Zhang Yuanbo, Xu Bowen, Pan Jian; заявитель Shenyang University of Technology. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN248492461> (дата обращения: 04.02.2026).
56. Патент № 211617713 U Китайская Народная Республика, МПК B61G 7/04. Railway hump operation unhooking robot walking system: 201922373421.X: заявл. 26.12.2019: опубл. 02.10.2020 / Zhang Xiaoqiang, Ma Yukun, An Di, Bao Lukun, Li Kejia, Hu Gan, Che Dehui, Zhang Liang, Zhang Defu, Ren Jianzhong, Li Yang, Ma Bin, Yu Wang, Yang Lin; заявитель China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Institute of Transport and Economics, Shenyang Quickhigh Robot Application Technology Co., Ltd., China Railway Shenyang Group Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN308421096> (дата обращения: 04.02.2026).
57. Патент № 116985862 В Китайская Народная Республика, МПК B61G 7/04. Automatic unhooking device for train: 202311180696.6: заявл. 13.09.2023: опубл. 03.11.2023 / Ni Wenbo, Liu Zhiquan, Wang Xuemei, Liu Yakang, Yang Xudong, Diao Shun, Liu Zeyi, Li Wenhao; заявитель Southwest Jiaotong University. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN414536702> (дата обращения: 04.02.2026).
58. Патент № 208417 U1 Российская Федерация, МПК B61G 7/04. Промышленный робот для автоматического расцепления движущихся грузовых вагонов: 2021121688: заявл. 21.07.2021 : опубл. 17.12.2021 / Садуев Р. Р.; заявитель Садуев Р. Р. – URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=208417&TypeFile=html (дата обращения: 04.02.2026).
59. Патент № 216401430 U Китайская Народная Республика, МПК B61G 7/04. Railway hump operation robot train speed sharing device: 202121664834.4: заявл. 21.07.2021: опубл. 29.04.2022 / Deng Pingping, Yu Wang, Wang Chen, Zhang Dehua; заявитель Shenyang Qihui Robot Application Technology Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN360669205> (дата обращения: 04.02.2026).
60. Кудюкин В.В., Вуколов А.В., Кузьмин В.С. Имитационное моделирование работы робототехнических комплексов, предназначенных для расформирования составов на сортировочных горках // Автоматика на транспорте. – 2025. – Т. 11, № 1. – С. 16-29. – DOI 10.20295/2412-9186-2025-11-01-16-29. – EDN UBHDRQ.

61. Патент № 110386164 А Китайская Народная Республика, МПК B61G 7/00, G05B 19/042. Intelligent unhooking system for railroad freight transportation and method: 201910708496.0: заявл. 01.08.2019 : опубл. 29.10.2019 / Shao Zhiguo, Zhou Runsheng, Xie Ping, Sun Changhui; заявитель Dalian Great Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN276144626> (дата обращения: 04.02.2026).
62. Патент № 2732676 С1 Российская Федерация, МПК B61G 7/04, B61C 17/12, B25J 5/00. Устройство для расцепления железнодорожных вагонов: 2020112217: заявл. 25.03.2020: опубл. 21.09.2020 / Волков А.В., Грибков О.И., Лозовский Е.Ю., Волкова А.В., Стручалин В.Г., Яшкин А.П.; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ)). – URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2732676&TypeFile=html (дата обращения: 04.02.2026).
63. Патент № 115195810 В Китайская Народная Республика, МПК B61K 11/00, B61G 7/04. A kind of automatic operation method and operation system of hook lifting in hump shunting dismantling operation: 202210915731.3: заявл. 01.08.2022: опубл. 18.10.2022 / Yue Hao, Xia Shengli, Qiu Shuai; заявитель Beijing Jiaotong University. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN377436039> (дата обращения: 04.02.2026).
64. Патент № 113460111 В Китайская Народная Республика, МПК B61G 7/14. Hook lifting mechanical arm of railway hump operation robot: 202110819519.2 : заявл. 20.07.2021: опубл. 01.10.2021 / Yu Wang, Deng Pingping, Zhang Dehua, Wang Chen; заявитель Shenyang Qihui Robot Application Technology Co., Ltd. – URL: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN339141369&_cid=P21-MKY3MC-97306-1 (дата обращения: 04.02.2026).
65. Патент № 218661815 U Китайская Народная Республика, МПК B61G 7/04, B61G 7/14. Automatic unhooking robot for railway hump operation: 202223279377.4: заявл. 08.12.2022: опубл. 21.03.2023 / Yu Wang, Deng Pingping, Zhang Dehua, Wang Chen; заявитель Shenyang Quickhigh Robot Application Technology Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN394547868> (дата обращения: 04.02.2026).
66. Патент № 219428128 U Китайская Народная Республика, МПК B61G 7/04. Position adjusting device and unhooking system: 202320875778.1: заявл. 18.04.2023 : опубл. 28.07.2023 / Zhou Jun, Shi Lei, Qin Fulin, He Xiaohui, Wang Zhigang, Mo Quanhui, Xu Dong, Chen Yuxiang; заявитель Sichuan Guoruan Science & Technology Group Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN404020527> (дата обращения: 04.02.2026).
67. Патент № 119795198 В Китайская Народная Республика, МПК B25J 9/16, B61G 7/04, G06V 20/56, G06V 10/22, G06V 10/25, G06V 10/20. Operation control method and system of unhooking robot : 202510300569.8: заявл. 14.03.2025: опубл. 11.04.2025 / Deng Pingping, Yu Wang, Hou Wenqi, Wei Yuanyi, Wang Jian, Han Fei, Wang Hongyu, Zhang Chunlei, Liu Xiaoliang, Liu Fuwang, Li Shuai, Yu Xuying, Lian Yaqi; заявитель Shenyang Quickhigh Robot Application Technology Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN454503441> (дата обращения: 04.02.2026).
68. Boddiford A. et al. Autonomous Robotic System for Pin Pulling Operation in Rail Yard //International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. – American Society of Mechanical Engineers, 2015. – Vol. 57137. – P. V05BT08A022.
69. Патент № 118618454 А Китайская Народная Республика, МПК B61L 27/00, B61L 27/04, B61L 15/00, B61L 23/00, B61G 7/04. Automatic hump disintegration system and method : 202410659790.8: заявл. 27.05.2024: опубл. 10.09.2024 / Li Jiazhuang, Zheng Junping, Jiang Qiulin, Fang Ming, Gong Chaosheng; заявитель Wuhan Iron & Steel Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN439199677> (дата обращения: 04.02.2026).
70. Патент № 2379206 С1 Российская Федерация, МПК B61G 1/00. Устройство авторасцепки грузовых вагонов: 2008116430/11: заявл. 29.04.2008: опубл. 20.01.2010 / Ирпер Г.Ю., Костоусов В.Б., Перевалов Д.С., Свердлов В.Б.; заявитель Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». – URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2379206&TypeFile=html (дата обращения: 04.02.2026).
71. Патент № 115837924 А Китайская Народная Республика, МПК B61L 23/00. Hump intelligent hook lifting result detection method : 202211530797.7: заявл. 01.12.2022: опубл. 24.03.2023 / Ji Haipeng, Hou Xihong, Shi Chenjun, Zhou Yinzhui, Xiao Yunxiang, Zhao Xueyou, Li Jun, Liu Xu, Ding Jian, Wang Shijie, Zhang Xiaohui, Wu Jinyuan, Ni Qi, Liu Shuling, Zheng Yuzhu; заявитель Tianjin Development Zone Jingnuo Hanhai Data Technology Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN395075268> (дата обращения: 04.02.2026).
72. Патент № 119820630 В Китайская Народная Республика, МПК B25J 19/00, B25J 9/16, G01M 99/00, B61G 7/04, G06F 18/23, G06N 20/00. State self-checking system of unhooking robot: 202510307782.1: заявл. 17.03.2025 : опубл. 15.04.2025 / Deng Pingping, Yu Wang, Hou Wenqi, Wei Yuanyi, Wang Jian, Han Fei, Wang Hongyu, Zhang Chunlei, Liu Xiaoliang, Guo Quanxing, Bai Xiaoshuang, Sun Jianbo; заявитель Shenyang Quickhigh Robot Application Technology Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN454520116> (дата обращения: 04.02.2026).

73. Han Y., Wang C., Yao J. Train Coupling Robot Based on Extended Implicit Self-Correction Generalized Predictive Control // 2024 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). – IEEE, 2024. – P. 1484-1489.
74. Патент № 219428126 U Китайская Народная Республика, МПК B61G 7/04. Train unhooking device : 202320871246.0: заявл. 18.04.2023: опубл. 28.07.2023 / Zhao Guozhi, Li Weiping, Liu Hong, Xue Yancheng, Liu Hongzhou, Wang Zuodong, Qin Yulong, Li Kun, Li Wei, Yang Daixu, Li Runqiang; заявитель Shaanxi Yuheng Railway Co., Ltd., Sichuan Guoruan Science & Technology Group Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN404024542> (дата обращения: 04.02.2026).
75. Патент № 219428130 U Китайская Народная Республика, МПК B61G 7/04. Unhooking device and system with unlocking function: 202320880542.7: заявл. 18.04.2023: опубл. 28.07.2023 / Zhou Jun, He Xiaohui, Shi Lei, Mo Quanhu, Wang Zhigang, Gao Xuchao, Liu Weiwei, Li Wei; заявитель Sichuan Guoruan Science & Technology Group Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN404024554> (дата обращения: 04.02.2026).
76. Патент № 219428129 U Китайская Народная Республика, МПК B61G 7/04. Unhooking system: 202320875786.6: заявл. 18.04.2023: опубл. 28.07.2023 / Zhou Jun, Xu Dong, Shi Lei, Mo Quanhu, Wang Zhigang, He Xiaohui, Lei Hubing, Chen Yuxiang, Chen Xiaoyu; заявитель Sichuan Guoruan Science & Technology Group Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN404020528> (дата обращения: 04.02.2026).
77. Патент № 216401431 U Китайская Народная Республика, МПК B61G 7/14. Hook lifting manipulator of railway hump operation robot: 202121653070.9: заявл. 20.07.2021 : опубл. 29.04.2022 / Yu Wang, Deng Pingping, Zhang Dehua, Wang Chen; заявитель Shenyang Qihui Robot Application Technology Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN360669168> (дата обращения: 04.02.2026).
78. Патент № 113525445 A Китайская Народная Республика, МПК B61G 7/14. Automatic unhooking robot for railway hump operation: 202110844475.9: заявл. 26.07.2021: опубл. 22.10.2021 / Yu Wang, Deng Pingping, Zhang Dehua, Wang Chen; заявитель Shenyang Qihui Robot Application Technology Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN340389056> (дата обращения: 04.02.2026).
79. Озеров А.В., Бочков А.В. Текущее состояние и перспективы мировых исследований в области интеллектуального железнодорожного транспорта // Интеллектуальный транспорт. – 2025. – Т. 9, № 2 (34). – С. 43-66. – EDN QFUBXM.
80. Патент № 118810854 A Китайская Народная Республика, МПК B61G 7/04. Mechanical unhooking device, unhooking system and unhooking method: 202310415783.9: заявл. 18.04.2023: опубл. 22.10.2024 / Zhao Guozhi, Feng Bin, Zhang Zhichun, Zhang Aimin, Pang Libo, Sun Linfeng, Ma Junjie, Ning Xiaoli, Liu Yuxin, Shi Lei, He Xiaohui, Yang Daixu, Li Runqiang; заявитель Shaanxi Yuheng Railway Co., Ltd., Sichuan Guoruan Science & Technology Group Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN442100658> (дата обращения: 04.02.2026).
81. Патент № 219806817 U Китайская Народная Республика, МПК B61G 7/04. Clamping type unhooking clamp, device and system: 202320875791.7: заявл. 18.04.2023: опубл. 10.10.2023 / Zhou Jun, Shi Lei, He Xiaohui, Mo Quanhu, Wang Zhigang, Yuan Huaguo, Liu Weiwei, Gao Xuchao, Yang Baihai; заявитель Sichuan Guoruan Science & Technology Group Co., Ltd. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN411450932> (дата обращения: 04.02.2026).
82. Патент № 2732676 C1 Российская Федерация, МПК B61G 7/04, B61C 17/12, B25J 5/00. Устройство для расцепления железнодорожных вагонов: 2020112217: заявл. 25.03.2020: опубл. 21.09.2020 / Волков А.В., Грибков О.И., Лозовский Е.Ю., Волкова А.В., Стручалин В.Г., Яшкин А.П.; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ). – URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2732676&TypeFile=html (дата обращения: 04.02.2026).
83. Стрельникова Э.Н., Яшкин А.П., Нарусова Е.Ю., Стручалин В.Г. Разработка автоматизированных электронно-механических устройств по отцепке вагонов железнодорожного состава // Современные вызовы транспортной отрасли: новые возможности: Матер. межвузовской научно-практической конференции транспортных вузов, Санкт-Петербург, 04–06 апреля 2023 года. – М.: Изд-во «Перо», 2023. – С. 431-435. – EDN AQKXHF.
84. Struchalin V.G. et al. Development of robotic systems to improve the safety of railway transport operations // 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). – IEEE, 2022. – P. 1749-1752.

REFERENCES

1. Dolgii A.I. Tekhnologii intensivnogo razvitiya OAO «RZhD» – effektivnyy otvet na sovremennyye vyzovy [Technologies of intensive development of JSC «Russian Railways» - an effective response to modern challenges], *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport], 2025, No. 7, pp. 6-15. EDN EUZNII.
2. Antonov A.A., Kuz'min V.S., Tsybanov I.A. Razvitie tekhnicheskikh sredstv dlya snizheniya proizvodstvennogo travmatizma [Development of technical means for reducing industrial injuries], *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, Communication, Informatics], 2022, No. 11, pp. 31-34. DOI 10.34649/AT.2022.11.11.005. EDN FLOCTZ.
3. Boddiford A.S. Improving the safety and efficiency of rail yard operations using robotics: Dissertation, 2013.
4. Dolgii A.I. Tsifrovaya zheleznodorozhnaya stantsiya kak klyuchevoy element povysheniya effektivnosti perevoznogo protsesssa [Digital railway station as a key element for improving the efficiency of the transportation process], *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport], 2025, No. 9, pp. 7-11.
5. Andreev V.E., Dolgii A.I., Kudyukin V.V., Xatlamadzhian A.E., Grishaev C.Yu., Ol'geizer I.A. Tsifrovaya zheleznodorozhnaya stantsiya - ot kontseptsii k real'nomu vnedreniyu [Digital railway station - from concept to real implementation], *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, Communication, Informatics], 2023, No. 9, pp. 2-6.
6. Nazimova S.A. TsZhS: novaya model' upravleniya [Digital Railway Station: new management model], *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, Communication, Informatics], 2025, No. 8, pp. 15-17. EDN JHHQNA.
7. Andreev V.E. Transformatsiya proizvodstvennykh protsessov v epokhu tsifrovyykh tekhnologiy [Transformation of production processes in the era of digital technologies], *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport], 2025, No. 9, pp. 4-6. EDN NNZRPX.
8. Kudyukin V.V., Tarasov K.A., Chupakhin D.P. Robototekhnicheskiy kompleks - komponent tsifrovoy zheleznodorozhnoy stantsii [Robotic complex - a component of the digital railway station], *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, Communication, Informatics], 2023, No. 8, pp. 10-14. DOI 10.34649/AT.2023.8.8.002. EDN QYICSY.
9. Bochkov A.V. Obzor zasedaniy sektsiy nauchno-tekhnicheskogo soveta AO «NIAS» v pervom polugodii 2025 goda [Review of meetings of sections of the Scientific and Technical Council of JSC «NIAS» in the first half of 2025], *Intellektual'nyy transport* [Intelligent Transport], 2025, Vol. 9, No. 2 (34), pp. 4-29. EDN UIMKIG.
10. Dolgii A.I., Xatlamadzhian A.E., Ozerov A.V., Bochkov A.V. Robotizatsiya na zheleznodorozhnom transporte [Robotization in railway transport], *Intellektual'nyy transport* [Intelligent Transport], 2025, Vol. 9, No. 3 (35), pp. 4-32. EDN JCBFIE.
11. Dolgii A.I. Kontseptual'nyy podkhod k postroeniyu sovremennoy platformy upravleniya perevoznym protsessom v OAO «RZhD» [Conceptual approach to building a modern platform for managing the transportation process in JSC «Russian Railways»], *Trudy AO «NIAS»* [Proceedings of JSC «NIAS»], 2021, Vol. 1, No. 11, pp. 9-31.
12. Xatlamadzhian A.E., Sokolov V.N., Ol'geizer I.A., Zolotarev Yu.F. Razvitie kompleksa sistemoobrazuyushchikh tekhnicheskikh resheniy tsifrovoy stantsii [Development of a complex of system-forming technical solutions for the digital station], *Trudy AO «NIAS»* [Proceedings of JSC «NIAS»], 2021, Vol. 2, No. 11, pp. 26-37.
13. Kudyukin V.V. Robotizatsiya kak neobkhodimyy element povysheniya effektivnosti protsesssa zheleznodorozhnykh perevozok [Robotization as a necessary element for improving the efficiency of the railway transportation process], *Transport Rossiiskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2023, No. 1-2 (104-105), pp. 13-16.
14. Sotnikov E.A., Shenfel'd K.P. Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya i ee vliyanie na zheleznyye dorogi [The fourth industrial revolution and its impact on railways], *Mir transporta* [World of Transport and Transportation], 2022, Vol. 20, No. 6(103), pp. 6-13.
15. Rosenberg E.N., Rakov V.V., Vikhrova N.Yu. Tseli i zadachi provedeniya patentnykh issledovaniy pri razrabotke zheleznodorozhnoy tekhniki [Goals and objectives of conducting patent research in the development of railway equipment], *Trudy AO «NIAS»* [Proceedings of JSC «NIAS»], 2021, Vol. 2, No. 11, pp. 287-297.
16. Patent 112455492 (CN). Unhooking and hooking device and control method thereof, 2021. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN320827770> (accessed 04 February 2026).
17. Patent 120681188 (CN). Railway hump hook lifting operation robot system and method, 2025. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN464967183> (accessed 04 February 2026).
18. Patent 118683589 (CN). Universal train intelligent unhooking and rehooking system and method, 2024. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN440603928> (accessed 04 February 2026).

19. Patent 115571185 (CN). Automatic unhooking device for open wagon and working method, 2023. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN389993469> (accessed 04 February 2026).
20. Patent 3095666 (EP). Device for uncoupling an elongated screw coupling, 2016. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/ru/detail.jsf?docId=EP179901459> (accessed 04 February 2026).
21. Salger P., Jost F., Gratzfeld P. Autonomous Coupling System for Goods Rail Traffic a robotic solution for marshalling yards handling hook-and-chain couplings, *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*. IEEE, 2018, pp. 443-448.
22. Patent 4594154 (EP). Method for disassembling and reassembling a train, automatic train coupling, and train, 2025.
23. Makhutov N.A., Rosenberg E.N., Andreev V.E. [et al.]. Bezopasnost' Rossii. Pravovye, sotsial'no-ekonomicheskie i nauchno-tekhnicheskie aspekty: Obespechenie funktsional'noy bezopasnosti zheleznodorozhnogo transporta [Safety of Russia. Legal, socio-economic and scientific-technical aspects: Ensuring functional safety of railway transport]. Moscow: AO «Nauchno-issledovatel'skiy i proektno-konstruktorskiy institut informatizatsii, avtomatizatsii i svyazi na zheleznodorozhnom transporte», 2024, 504 p. EDN BHXJQV.
24. RZhd nachali ispol'zovat' robot-manipulyator, kotoryy zanimaetsya rastsepkoy vagonov [Russian Railways began using a robot manipulator for uncoupling wagons], *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and Electrical Equipment of Transport], 2023, No. 4-6, pp. 41. EDN FIWRSO.
25. Kudyukin V.V., Ozerov A.V. Vektory tsifrovoy transformatsii zheleznykh dorog [Vectors of digital transformation of railways], *Nauka i tekhnologii zheleznykh dorog* [Science and Technologies of Railways], 2023, Vol. 7, No. 4 (28), pp. 18-24. EDN SBPFZO.
26. Kudyukin V.V., Dudorov E.A., Vukolov A.V., Kotova K.A. Robotizatsiya kak element tsifrovoy transformatsii [Robotization as an element of digital transformation], *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport], 2022, No. 5, pp. 19-23. EDN NMAETQ.
27. Avtomatizatsiya rabot v peregruzochnykh terminalakh [Automation of work in transshipment terminals], *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the World], 2015, No. 8, pp. 15-18. EDN UBEDGP.
28. Shabelnikov A.N. Railway Sorting Robotics, In: *Proceedings of the Fourth International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'19). IITI 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1156. Springer, Cham, 2020. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50097-9_63.
29. Tan H., et al. An Integrated Robotic System for Autonomous Brake Bleeding in Rail Yards, *International Conference on Intelligent Autonomous Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 157-173.
30. Dudorov E.A., Kudyukin V.V., Kotova K.A. Robototekhnicheskie komplekсы obsluzhivaniya podvizhnogo sostava rossiiskikh zheleznykh dorog [Robotic complexes for servicing rolling stock of Russian railways], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering], 2022, No. 9 (750), pp. 3-15. EDN OANIVQ.
31. Dudorov E.A., Kotova K.A., Kudyukin V.V., Zhidenko I.G. Robototekhnicheskie komplekсы dlya obsluzhivaniya podvizhnogo sostava [Robotic complexes for servicing rolling stock], *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolii: Tekhnika zheleznykh dorog* [Bulletin of the Institute for Natural Monopoly Problems: Railway Engineering], 2022, No. 1 (57), pp. 50-55. EDN LGULAX.
32. Okhotnikov A.L., Zazhigalkin A.V. Obzor klyuchevykh tekhnologiy robototekhniki [Review of key robotics technologies], *Problemy iskusstvennogo intellekta* [Problems of Artificial Intelligence], 2025, No. 1 (36), pp. 141-155. EDN YRDWLG.
33. Kudyukin V.V., Kukushkin S.S., Khakiev Z.B. Sozdanie ustoichivyykh i bezopasnykh kanalov peredachi informatsii dlya upravleniya robototekhnicheskimi kompleksami [Creating stable and secure information transmission channels for managing robotic complexes], *Trudy AO «NIAS»* [Proceedings of JSC «NIAS»], Vol. 2, Issue 11. M.: Tipografiya AO «T 8 Izdatel'skie Tekhnologii», 2021, pp. 209-215. EDN KSPUUD.
34. Kalinin A.V., Dolganyuk S.I., Savitskiy A.G. K voprosu postroeniya sistemy upravleniya tekhnologicheskim protsessom Tsifrovoy stantsii [On the issue of building a control system for the technological process of the Digital Station], *Tr. AO «NIAS»* [Proceedings of JSC «NIAS»], Vol. 2, Issue 11. Moscow: Tipografiya AO «T 8 Izdatel'skie Tekhnologii», 2021, pp. 9-25. – EDN HRSUOA.
35. Dudorov E.A., Kotova K.A. Sistema upravleniya manipulyatorom robototekhnicheskogo kompleksa dlya obsluzhivaniya mekhanizmov stepki i tormoznoy sistemy zheleznodorozhnykh vagonov [Control system for the manipulator of a robotic complex for servicing coupling mechanisms and brake system of railway wagons], *Aktual'nye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Current Problems of Modern Science, Technology and Education], 2021, Vol. 12, No. 1, pp. 58-64. – EDN YMSRJQ.

36. Kotova K., Dudorov E. and Kudyukin V. Manipulator Control System for Railroad Transport Coupling and Braking System Maintenance, *2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation, 2021*, pp. 601-605. doi: 10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537477.
37. Patent 118343181 (CN). Train unhooking robot and unhooking method, 2024. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN436449050> (accessed 04 February 2026).
38. Patent 113894765 (CN). Automatic train unhooking robot and system, 2022. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN348114972> (accessed 04 February 2026).
39. Yao J. et al. Design and its characteristic analysis of a wheeled train uncoupling robot with multi-degrees-of-freedom, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2016, Vol. 230, I. 10, pp. 1673-1684.
40. Yao J. et al. Position and orientation error analysis and its compensation for a wheeled train uncoupling robot with four degrees-of-freedom, *IET Intelligent Transport Systems*, 2015, Vol. 9, I. 2, pp. 156-166.
41. Patent 2834370 (RU). Sposob peremeshcheniya mobil'noy platformy robototekhnicheskogo kompleksa, prednaznachennogo dlya rospuska zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava na sortirovochnoy gorke [Patent 2834370 (RU). Method for moving a mobile platform of a robotic complex intended for disbanding railway rolling stock on a sorting hump], 2025. Available at: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2834370&TypeFile=html (accessed 04 February 2026).
42. Patent 211617712 (CN). Unhooking robot system for railway hump operation, 2020. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN308421034> (accessed 04 February 2026).
43. Patent 2450946 (RU). Sistema avtorastsepki vagonov na sortirovochnoy gorke [Patent 2450946 (RU). System for automatic uncoupling of cars on a sorting hump], 2012. Available at: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2450946&TypeFile=html (accessed 04 February 2026).
44. Patent 113428186 (CN). Railway hump operation robot train speed sharing device, 2021. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN338610815> (accessed 04 February 2026).
45. Patent 208715207 (CN). Be applied to automatically unhook equipment that railway freight car breaks off relations, 2019. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN241361309> (accessed 04 February 2026).
46. Patent 219584182 (CN). Unhooking device and system, 2023. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN406567207> (accessed 04 February 2026).
47. Patent 113942539 (CN). Decoupling and re-hooking robot and decoupling and hooking operation method thereof, 2022. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN349223109> (accessed 04 February 2026).
48. Patent 113844488 (CN). Railway hump operation lifting hook walking device, 2021. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN346980478> (accessed 04 February 2026).
49. Patent 119017354 (CN). Hook lifting robot for railway hump operation, 2024. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN443852489> (accessed 04 February 2026).
50. Patent 120921331 (CN). Hump operation lifting hook robot, 2025. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN468572793> (accessed 04 February 2026).
51. Patent 216043 (RU). Ustroystvo avtomaticheskogo rastsepleniya vagonov [Patent 216043 (RU). Device for automatic uncoupling of cars], 2023. Available at: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=216043&TypeFile=html (accessed 04 February 2026).
52. Patent 2728968 (RU). Sposob avtomaticheskogo rastsepleniya avtostsepok dvizhushchikhsya vagonov i ustroystvo ego osushchestvleniya [Patent 2728968 (RU). Method for automatic uncoupling of moving car couplers and device for its implementation], 2020. Available at: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2728968&TypeFile=html (accessed 04 February 2026).
53. Patent 2700208 (RU). Ustroystvo dlya avtomaticheskogo rastsepleniya vagonov dvizhushchikhsya poyezdov [Patent 2700208 (RU). Device for automatic uncoupling of moving train cars], 2019. Available at: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2700208&TypeFile=html (accessed 04 February 2026).
54. Patent 102616247 (CN). Train unhooking robot, 2012. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN85249970> (accessed 04 February 2026).
55. Patent 109940580 (CN). Frame-type railway unhooking manipulator, 2019. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN248492461> (accessed 04 February 2026).
56. Patent 211617713 (CN). Railway hump operation unhooking robot walking system, 2020. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN308421096> (accessed 04 February 2026).
57. Patent 116985862 (CN). Automatic unhooking device for train, 2023. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN414536702> (accessed 04 February 2026).

58. Patent 208417 (RU). Promyshlennyy robot dlya avtomaticheskogo rastsepleniya dvizhushchikhsya gruzovykh vagonov [Patent 208417 (RU). Industrial robot for automatic uncoupling of moving freight cars], 2021. Available at: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=208417&TypeFile=html (accessed 04 February 2026).
59. Patent 216401430 (CN). Railway hump operation robot train speed sharing device, 2022. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN360669205> (accessed 04 February 2026).
60. Kudyukin V.V., Vukolov A.V., Kuzmin V.S. Imitatsionnoe modelirovanie raboty robototekhnicheskikh kompleksov, prednaznachennykh dlya rasformirovaniya sostavov na sortirovochnykh gorkakh [Simulation modeling of the operation of robotic complexes intended for train disassembly at sorting humps], *Avtomatika na transporte* [Transport Automation Research], 2025, Vol. 11, No. 1, pp. 16-29. DOI 10.20295/2412-9186-2025-11-01-16-29. EDN UBHDRQ.
61. Patent 216386164 (CN). Intelligent unhooking system for railroad freight transportation and method, 2019. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN276144626> (accessed 04 February 2026).
62. Patent 2732676 (RU). Ustroystvo dlya rastsepleniya zheleznodorozhnykh vagonov [Patent 2732676 (RU). Device for uncoupling railway cars], 2020. Available at: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2732676&TypeFile=html (accessed 04 February 2026).
63. Patent 115195810 (CN). A kind of automatic operation method and operation system of hook lifting in hump shunting dismantling operation, 2022. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN377436039> (accessed 04 February 2026).
64. Patent 113460111 (CN). Hook lifting mechanical arm of railway hump operation robot, 2021. Available at: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN339141369&_cid=P21-MKY3MC-97306-1 (accessed 04 February 2026).
65. Patent 218661815 (CN). Automatic unhooking robot for railway hump operation, 2023. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN394547868> (accessed 04 February 2026).
66. Patent 219428128 (CN). Position adjusting device and unhooking system, 2023. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN404020527> (accessed 04 February 2026).
67. Patent 119795198 (CN). Operation control method and system of unhooking robot, 2025. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN454503441> (accessed 04 February 2026).
68. Boddiford A. et al. Autonomous Robotic System for Pin Pulling Operation in Rail Yard, *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2015, Vol. 57137, pp. V05BT08A022.
69. Patent 118618454 (CN). Automatic hump disintegration system and method, 2024. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN439199677> (accessed 04 February 2026).
70. Patent 2379206 (RU). Ustroystvo avtorastsepy gruzovykh vagonov [Patent 2379206 (RU). Device for automatic uncoupling of freight cars], 2010. Available at: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2379206&TypeFile=html (accessed 04 February 2026).
71. Patent 115837924 (CN). Hump intelligent hook lifting result detection method, 2023. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN395075268> (accessed 04 February 2026).
72. Patent 119820630 (CN). State self-checking system of unhooking robot, 2025. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN454520116> (accessed 04 February 2026).
73. Han Y., Wang C., Yao J. Train Coupling Robot Based on Extended Implicit Self-Correction Generalized Predictive Control, 2024 *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. IEEE, 2024, pp. 1484-1489.
74. Patent 219428126 (CN). Train unhooking device, 2023. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN404024542> (accessed 04 February 2026).
75. Patent 219428130 (CN). Unhooking device and system with unlocking function, 2023. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN404024554> (accessed 04 February 2026).
76. Patent 219428129 (CN). Unhooking system, 2023. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN404020528> (accessed 04 February 2026).
77. Patent 216401431 (CN). Hook lifting manipulator of railway hump operation robot, 2022. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN360669168> (accessed 04 February 2026).
78. Patent 113525445 (CN). Automatic unhooking robot for railway hump operation, 2021. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN340389056> (accessed 04 February 2026).
79. Ozerov A.V., Bochkov A.V. Tekushchee sostoyanie i perspektivy mirovykh issledovaniy v oblasti intellektual'nogo zheleznodorozhnogo transporta [Current state and prospects of global research in the field of intelligent railway transport], *Intellektual'nyi transport* [Intelligent Transport], 2025, Vol. 9, No. 2(34), pp. 43-66.

80. Patent 118810854 (CN). Mechanical unhooking device, unhooking system and unhooking method, 2024. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN442100658> (accessed 04 February 2026).
81. Patent 219806817 (CN). Clamping type unhooking clamp, device and system, 2023. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN411450932> (accessed 04 February 2026).
82. Patent 2732676 (RU). Ustroystvo dlya rastsepleniya zheleznodorozhnykh vagonov [Patent 2732676 (RU). Device for uncoupling railway cars], 2020. Available at: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2732676&TypeFile=html (accessed 04 February 2026).
83. *Strelnikova E.N., Yashkin A.P., Narusova E.Yu., Struchalin V.G.* Razrabotka avtomatizirovannykh elektronno-mekhanicheskikh ustroystv po otsepke vagonov zheleznodorozhnogo sostava [Development of automated electromechanical devices for uncoupling railway wagons] // *Sovremennye vyzovy transportnoi otrasli: novye vozmozhnosti: Mater. mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii transportnykh vuzov* [Modern challenges of the transport industry: new opportunities: Proceedings of the interuniversity scientific-practical conference of transport universities]. Moscow: Izdatel'stvo «Pero», 2023, pp. 431-435. EDN AQKXHF.
84. *Struchalin V.G. et al.* Development of robotic systems to improve the safety of railway transport operations, *2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. IEEE, 2022, pp. 1749-1752.

Кудюкин Владимир Валерьевич – Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте»; e-mail: v.kudukin@vniias.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74992628883 (доб. 12801); зам. генерального директора; <https://orcid.org/0009-0008-2807-7217>.

Кузьмин Владислав Сергеевич – Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте»; e-mail: vs.kuzmin@vniias.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79037090586; отдел научно-исследовательской работы центра интеллектуальных и программных решений научно-технического комплекса интеллектуальных систем контроля и управления; в.н.с.; к.т.н.; <https://orcid.org/0000-0001-9181-0145>.

Kudyukin Vladimir Valer'evich – JSC Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport; e-mail: v.kudukin@vniias.ru; Moscow, Russia; phone: +74992628883 (доб. 12801); deputy general director; <https://orcid.org/0009-0008-2807-7217>.

Kuz'min Vladislav Sergeevich – JSC Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport; e-mail: vs.kuzmin@vniias.ru; Moscow, Russia; phone: +79037090586; Research Department of the Center for Intelligent and Software Solutions of the Scientific and Technical Complex of Intelligent Control and Management Systems; Leading Research Officer; cand. of eng. sc.; <https://orcid.org/0000-0001-9181-0145>.

УДК 623.746.-519

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-35-45

Л.А. Рыбак, И.А. Дуюн, В.В. Черкасов, А.А. Волошкин, Т.А. Дуюн

РАЗРАБОТКА ЭВРИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ ЛОКАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ БПЛА НА ОСНОВЕ ПАТТЕРНОВ ОГИБАНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ

Важной задачей при создании информационно-управляющей системы для обеспечения автономной навигации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в условиях отсутствия спутниковой связи является формирование локальной траектории движения при наличии препятствий (деревья, линии электропередач и др.). Целью исследования является разработка эвристических алгоритмов, обеспечивающих оптимизацию локальной траектории БПЛА с использованием данных LiDAR и построения допустимой локальной траектории на основе паттернов огибания препятствий. Предложена концепция, основанная на двух этапах: декомпозиция облака точек LiDAR в виде ориентированных ограничивающих параллелепипедов (ОВВ) и формирование траектории обхода ОВВ с использованием геометрических паттернов. На первом этапе реализован классический (геометрический) конвейер обработки LiDAR-данных: воксельное прореживание, выделение плоскости земли методом RANSAC, кластеризация

ция DBSCAN и построение параллелепипедов вокруг кластеров. Данный подход реализован в виде программного модуля на языке Python. Выполнено моделирование для двух сценариев. Первый сценарий содержал 3 препятствия, одно из которых являлось одиночным, а второе и третье располагались рядом в группе. Сгенерированная траектория позволила выполнить обход всех препятствий, время построения траектории составило 0,29 миллисекунд. Вторым сценарий выполнен для набора OBB, полученных в результате декомпозиции облака точек, общее количество препятствий вместе с «землей» составило 678. Время выполнения построения траектории в этом случае составило 0,377 секунд. Подход обеспечивает предсказуемое быстроедействие и линейную оценку вычислительной сложности по числу препятствий, что делает его перспективным для применения в системах автономной навигации и управления движением БВС.

LiDAR; облако точек; voxel grid; RANSAC; DBSCAN; OBB; AABB; локальная траектория; обход препятствий; БВС.

L.A. Rybak, I.A. Duyun, V.V. Cherkasov, A.A. Voloshkin, T.A. Duyun

DEVELOPMENT OF HEURISTIC ALGORITHMS FOR OPTIMIZING THE LOCAL TRAJECTORY OF UAVS BASED ON OBSTACLE AVOIDANCE PATTERNS

A key challenge in developing an information and control system for autonomous navigation of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the absence of satellite communications is the generation of a local trajectory in the presence of obstacles (trees, power lines, etc.). The goal of this study is to develop heuristic algorithms that optimize the UAV's local trajectory using LiDAR data and construct a feasible local trajectory based on obstacle avoidance patterns. A two-stage concept is proposed: decomposing the LiDAR point cloud into oriented bounding boxes (OBBs) and generating a trajectory for traversing the OBBs using geometric patterns. The first stage implements a classic (geometric) LiDAR data processing pipeline: voxel thinning, ground plane extraction using the RANSAC method, DBSCAN clustering, and constructing bounding boxes around the clusters. This approach is implemented as a Python software module. Simulations were performed for two scenarios. The first scenario contained three obstacles, one of which was isolated, while the second and third were located in a group. The generated trajectory avoided all obstacles, with a trajectory construction time of 0.29 milliseconds. The second scenario was performed for a set of obstructions obtained by point cloud decomposition; the total number of obstacles, including the ground, was 678. [This is a fragment of the original text. The trajectory construction time in this case was 0.377 seconds. This approach provides predictable performance and a linear computational complexity estimate based on the number of obstacles, making it promising for use in autonomous navigation and UAV motion control systems.

LiDAR; point cloud; voxel grid; RANSAC; DBSCAN; OBB; AABB; local trajectory; obstacle avoidance; UAV.

Введение. Важной задачей при создании информационно-управляющей системы для обеспечения автономной навигации БВС в условиях отсутствия спутниковой связи является формирование локальной траектории движения БВС при наличии препятствий в зоне мониторинга (деревья, линии электропередач и др.). В этой связи в рамках проекта предложена концепция оптимизации локальной траектории, основанная на двух этапах: декомпозиция облака точек, полученных в результате построения трёхмерных карт местности, в виде ориентированных ограничивающих параллелепипедов (OBB) и формирование траектории обхода полученных OBB с использованием различных паттернов обигания препятствий.

Планирование траектории полёта беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в трёхмерном пространстве с учётом препятствий – задача, активно исследуемая в последнее время [1–9]. Классические поисковые методы (например, алгоритмы Дейкстры) [10] представляют пространство полёта в виде дискретного графа и ищут кратчайший путь; построенные маршруты часто проходят слишком близко от препятствий и имеют резкие повороты [11]. Метод RRT (Rapidly-exploring Random Tree) [12, 13] быстро исследует пространство, строя дерево возможных путей, но генерирует зачастую неоптимальные траектории и при этом остаётся вычислительно ресурсоёмким [14]; в обзорах подчёркивается, что ряд алгоритмов «увеличивают сложность алгоритма, что может создать трудности в реальном времени» [15]. Методы на основе искусственных потенциалов формируют траектории быстро, но подвержены проблеме локальных минимумов [16–20].

В рамках проекта разработаны эвристические алгоритмы оптимизации локальной траектории на основе паттернов огибания препятствий, позволяющие формировать локальную траекторию в реальном времени с высокими показателями быстродействия. В отличие от существующих подходов, предлагаемые алгоритмы не основаны на стохастическом поиске или итеративной оптимизации всей траектории; вместо этого траектория строится поэтапно и локально модифицируется при обнаружении пересечения с препятствием по одному из заранее определённых геометрических паттернов обхода.

Описание решаемой задачи. Рассматривается задача построения допустимой траектории движения БВС в трёхмерном евклидовом пространстве R^3 при наличии статических препятствий сложной геометрической формы, декомпозированных в виде ориентированных ограниченных параллелепипедов (ОВВ).

БВС аппроксимируется шаром с радиусом r , центр которого движется по траектории Γ . Положение центра БВС на траектории в определенный момент времени обозначим как $\gamma(t)$. Соответственно, область R , занимаемая роботом в момент времени t , задаётся как

$$R(t) = \{x \in R^3 \mid \|x - \gamma(t)\| \leq r\}.$$

Пусть в пространстве присутствует конечное множество препятствий

$$O = \{O_1, \dots, O_N\},$$

каждое из которых аппроксимируется ориентированным параллелепипедом (ОВВ), задаваемым тройкой параметров

$$O_i = (C_i, R_i, e_i),$$

где C_i – центр препятствия, R_i – матрица ориентации локальной системы координат, $e_i = (e_{i1}, e_{i2}, e_{i3})$ – полуразмеры вдоль локальных осей. Множество точек, принадлежащих препятствию, определяется как

$$O_i = \{x \in R^3 \mid |(R_i^{-1}(x - C_i))_k| \leq e_{ik}, k = 1, 2, 3\}.$$

Для сведения задачи движения шара к задаче движения точки среди препятствий выполняется увеличение полуразмеров ОВВ на радиус r шара, декомпозирующего БВС, и величину c минимального безопасного расстояния (рис. 1). Введём расширенные препятствия $\tilde{O}_i$:

$$\tilde{O}_i = (C_i, R_i, \tilde{e}_i), \quad (1)$$

где $\tilde{e}_{ik} = e_{ik} + r + c$, $k = 1, 2, 3$, а множество точек препятствия записывается как

$$\tilde{O}_i = \{x \in R^3 \mid |(R_i^{-1}(x - C_i))_k| \leq e_{ik} + r + c, k = 1, 2, 3\}.$$

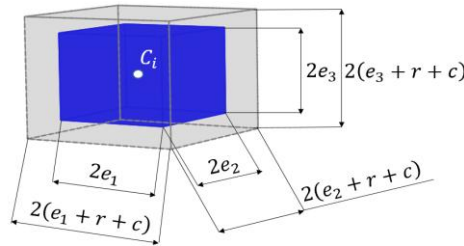


Рис. 1. Увеличение размеров ОВВ с учётом радиуса r и безопасного расстояния c

Обозначим множество препятствий с учётом увеличения размера как $\tilde{O} = \{\tilde{O}_1, \dots, \tilde{O}_N\}$. Тогда допустимой считается такая траектория Γ , что

$$\Gamma \cap (\cup_{i=1}^N \tilde{O}_i) = \emptyset.$$

Пусть заданы начальная и целевая точки траектории $P_0, P_M \in R^3$. В качестве исходной (базовой) траектории рассматривается отрезок

$$\gamma_0(s) = P_0 + s(P_M - P_0), \quad s \in [0, 1].$$

Если базовая траектория пересекает запрещённую область $\tilde{O}$, то требуется построить новую траекторию в виде ломаной линии, полученной последовательным применением локальной коррекции, без использования итерационных процедур глобальной оптимизации.

Методика исследования. Декомпозиция облака точек LiDAR и построение OBB. Предложена и реализована методология обработки облаков точек LiDAR, основанная на классическом конвейере (pipeline) последовательных этапов. Предложенный подход включает следующие шаги обработки:

1) Загрузка облака точек: чтение исходных данных лазерного сканирования (например, из файла формата PCD/PLY) в память для последующей обработки.

2) Воксельное прореживание: снижение плотности точек посредством voxel grid-фильтрации, при котором пространство разбивается на сетку вокселей фиксированного размера, и внутри каждого оставляется не более одной усреднённой точки. Например, каждой точке p_i с координатами (x_i, y_i, z_i) сопоставляется центральная точка соответствующего вокселя с координатами [5]:

$$x_c = l \cdot \lfloor \frac{x_i}{l} \rfloor + \frac{l}{2}, \quad y_c = l \cdot \lfloor \frac{y_i}{l} \rfloor + \frac{l}{2}, \quad z_c = l \cdot \lfloor \frac{z_i}{l} \rfloor + \frac{l}{2}.$$

3) Выделение плоскости земли (RANSAC): отделение основной горизонтальной поверхности (земли/дороги) от остального облака. Уравнение найденной плоскости записывается как $Ax + By + Cz + D = 0$. Для каждой точки $p = (x_0, y_0, z_0)$ расстояние до плоскости вычисляется по формуле [6]:

$$\rho = \frac{|Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}.$$

4) Кластеризация методом DBSCAN: группировка оставшихся (надземных) точек в кластеры, соответствующие отдельным объектам. Алгоритм DBSCAN имеет два ключевых параметра: ε – радиус соседства и MinPts – минимальное число точек в этом радиусе для образования плотного кластера [4]. Точки, не попавшие ни в одну плотную группу, помечаются как шумовые и не включаются в кластеры.

5) Построение ограничивающих 3D-параллелепипедов (AABB/OBB): для каждого найденного кластера вычисляется его ограничивающий параллелепипед. Ориентированный ограничивающий параллелепипед (OBB) вычисляется на основе PCA: вычисляется ковариационная матрица и находятся собственные направления, определяющие главные оси разброса точек; по проекциям точек на эти оси определяются размеры и ориентация параллелепипеда. В случаях вырожденной формы кластера применяется осесмещённый ограничивающий параллелепипед (AABB) [10].

В процессе разработки были учтены и внедрены ключевые решения: обработка вырожденных кластеров (отсеивание слишком малых или неинформативных групп точек), обоснованный выбор типа параллелепипеда для каждого объекта (OBB или AABB), подбор параметров алгоритмов на каждом этапе (размер вокселя, порог расстояния RANSAC, параметры ε и MinPts DBSCAN и др.), а также определение удобного формата выходных данных.

Программная реализация конвейера. Разработанный программный модуль реализует описанную методологию поэтапно. В данной реализации применялась библиотека Open3D для Python: выполняется воксельное прореживание (voxel downsample), затем сегментация плоскости земли методом RANSAC (segment_plane), далее кластеризация DBSCAN (cluster_dbscan) и построение AABB/OBB (get_axis_aligned_bounding_box / get_oriented_bounding_box). В качестве выходных данных формируется структура, содержащая информацию об обнаруженных объектах (число точек, параметры параллелепипедов), что упрощает последующее использование результатов.

Эвристическое планирование локальной траектории обхода препятствий. В рамках данного этапа рассмотрен эвристический метод формирования допустимой траектории движения БВС на основе локальной коррекции базовой траектории при обнаружении её

пересечения с препятствиями рабочей области. Построение траектории осуществляется итеративно: на каждом шаге анализируется пересечение текущего сегмента траектории с препятствиями $\tilde{O}_i$. В зависимости от конфигурации выбирается один из двух паттернов: обход одиночного препятствия или обход группы препятствий.

Алгоритм верхнего уровня. На i -й итерации фиксируется текущая точка P_k и рассматривается базовый сегмент движения из точки P_k в точку P_M :

$$\gamma_k(t) = P_k + t(P_M - P_k), \quad t \in [0,1].$$

Для сегмента $\gamma_k(t)$ выполняется проверка пересечения со всеми $\tilde{O}_i$ в локальных координатах препятствия. Множество координат отрезка $P_K^{(L)} P_M^{(L)}$ записывается как

$$l(t) = P_K^{(L)} + t(P_M^{(L)} - P_K^{(L)}), \quad t \in [0,1]. \quad (2)$$

Пересечение отрезка с $\tilde{O}_i$ определяется с использованием Slab метода [16]; пересечение существует, если

$$t_i^{(enter)} \leq t_i^{(exit)} \wedge t_i^{(enter)} \cap [0,1] \neq \emptyset. \quad (3)$$

Наиболее близким препятствием считается препятствие с минимальным $t_i^{(enter)}$. Далее выполняется классификация препятствия как одиночного или входящего в группу: для $j \neq i_0$ проверяется условие

$$\|C_j - C_{i_0}\| \leq \rho_j + \rho_{i_0} + 2(r + c), \quad (4)$$

где $\rho_i = \sqrt{e_{i1}^2 + e_{i2}^2 + e_{i3}^2}$. Синтезированный алгоритм показан на рис. 2.

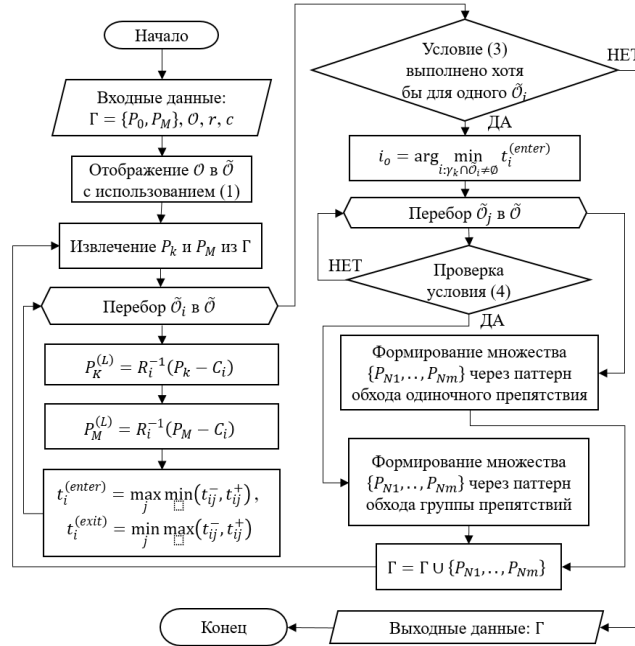


Рис. 2. Алгоритм оптимизации локальной траектории верхнего уровня

Паттерн обхода одиночного препятствия. Первой точкой P_{N1} , добавляемой к траектории между P_k и P_M , является точка, расположенная вдоль сегмента γ_k перед препятствием на расстоянии s :

$$P_{N1}^{(L)} = q_i^{(enter)} - cs, \quad s = \frac{P_M^{(L)} - P_K^{(L)}}{\|P_M^{(L)} - P_K^{(L)}\|}.$$

Вычисление последующих точек траектории обхода зависит от того, какие грани $\tilde{O}_i$ пересекаются сегментом γ_k ; в однозначных и неоднозначных случаях используются заранее заданные варианты обхода. Для того, чтобы после обхода БВС гарантированно «вышел» из зоны расширенного препятствия и не начинал следующий сегмент вплотную к границе, добавляется точка:

$$P_{N3}^{(L)} = P_{N2}^{(L)} + cs_{exit}, \quad (5)$$

где $s_{exit} = \frac{P_M^{(L)} - P_{N2}^{(L)}}{\|P_M^{(L)} - P_{N2}^{(L)}\|}$. В неоднозначных случаях среди допустимых вариантов выбирается тот, который минимизирует оценку длины обхода препятствия в локальной системе координат:

$$v = \operatorname{argmin}_{v \in 1, \dots, 4} \sum_{j=2}^3 \|P_{N,j,v}^{(L)} - P_{N,j-1,v}^{(L)}\| + \|P_M^{(L)} - P_{N,3,v}^{(L)}\|.$$

Каждая вычисленная точка $P_{Ni}^{(L)}$ в локальной системе переводится в глобальную систему координат:

$$P_{Nj} = R_i P_{Nj}^{(L)} + C_i.$$

Паттерн обхода группы препятствий. В случае наличия группы препятствий выбирается безопасное направление обхода u на плоскости, перпендикулярной направлению движения, и вычисляется поперечное смещение. Ближайшая допустимая точка $c_{\perp}$ (в проекционной плоскости) задаёт величину поперечного смещения:

$$Y_s = \|c_{\perp}\|. \quad (6)$$

Далее определяется отношение ρ_l для множества рёбер сечений препятствий, вводится

$$\rho_{min} = \min_l \rho_l, \quad (7)$$

и вычисляется допустимое продольное смещение

$$X_s = \rho_{min} Y_s. \quad (8)$$

Используя поперечное смещение (6) и продольное смещение (8), вычисляются ключевые точки ломаной обхода группы препятствий; затем траектория продолжается от новой точки по верхнеуровневому алгоритму.

Результаты и обсуждение. Результаты декомпозиции облака точек LiDAR. Для реализации использованы высокоуровневые инструменты Python. Основная обработка выполнена с помощью библиотеки Open3D (работа с облаками точек, сегментация и кластеризация). Дополнительно применяются NumPy (манипуляции с массивами координат) и Matplotlib (визуализация). Все вычисления выполняются на CPU.

Исходные данные: тестовый набор представляет собой облако точек LiDAR в формате PCD. Сцена содержит доминирующую плоскость (опорную поверхность) и множество объектов, расположенных над ней. Возможны шумовые отражения и разреженные точки. Общее количество точек на входе – 123 684.

Параметры пайплайна: облако было прорежено воксельным фильтром, после чего число точек уменьшилось до 62 257 (примерно в 2 раза). Далее методом RANSAC выделена доминирующая плоскость; после удаления её точек осталось 47 169 точек. Для кластеризации оставшихся точек использован DBSCAN (ϵ и MinPts подбирались экспериментально), получено 648 кластеров; размер кластеров варьируется от 2 до 6 938 точек. Число точек, отнесенных к шуму, – 4 441. Для каждого кластера построен ограничивающий параллелепипед: ориентированный (OBB), а при вырожденных случаях – осесмещённый (AABB). Итоговое число примитивов – 648.

Полученные результаты: алгоритм успешно разделил облако на опорную плоскость и набор объектов. Уровень шума после кластеризации составляет 4 441 точку (~9,4% от 47 169). Иллюстрации результатов представлены на рис. 3–5.

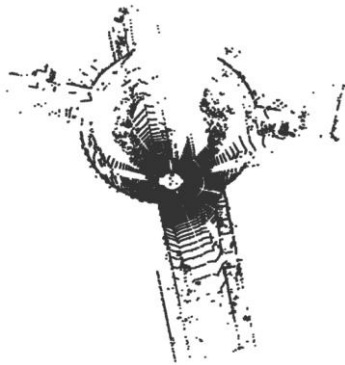


Рис. 3. Входное облако точек
LiDAR-сенсора
(top-down визуализация до сегментации)



Рис. 4. Кластеры объектов после
применения алгоритма DBSCAN



Рис. 5. Ограничивающие параллелепипеды вокруг каждого кластера

Сводные результаты вычислительного эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сводные результаты декомпозиции облака точек LiDAR

Этап обработки	Результат
Входное облако	123 684 точки
После воксельного фильтра	62 257 точек
После удаления плоскости (RANSAC)	47 169 точек
Кластеризация DBSCAN	648 кластеров (2...6 938 точек)
Шумовые точки	4 441 точки (~9,4%)
Bounding boxes	648 примитивов (ОВВ; ААВВ при вырожденных случаях)

Результаты моделирования алгоритмов планирования траектории. Разработанные эвристические алгоритмы локальной оптимизации траектории реализованы в виде программного модуля на языке Python. В ходе разработки использовались NumPy, Matplotlib и Shapely.

Выполнено моделирование для двух сценариев. Первый сценарий содержал 3 препятствия, одно из которых являлось одиночным, а второе и третье располагались рядом в группе; траектория позволяет выполнить обход всех препятствий. Время построения траектории составило 0,29 миллисекунд. Второй сценарий выполнен для набора ОВВ, полученных в результате декомпозиции облака точек; общее количество препятствий вместе с «землей» составило 678. Время выполнения построения траектории в этом случае составило 0,377 секунд; визуализация планирования приведена на рис. 6.

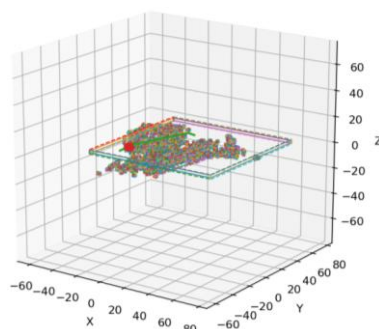


Рис. 6. Визуализация планирования траектории для сценария с набором ОВВ

Сравнение двух сценариев по числу препятствий и времени построения траектории приведено в табл. 2.

Таблица 2

Результаты моделирования планирования траектории

Сценарий	Число препятствий	Особенности	Время построения
Сценарий 1	3 (плюс «земля»)	одиночное препятствие и группа препятствий	0,29 мс
Сценарий 2	678 (вместе с «землёй»)	набор ОВВ из декомпозиции облака точек	0,377 с

Анализ вычислительной сложности. На каждом шаге верхнего уровня обрабатывается текущий сегмент траектории; для каждого препятствия выполняется проверка пересечения сегмента с ОВВ в локальной системе координат с использованием Slab метода и фиксированного числа арифметических операций. Если число препятствий равно N , то вычислительная сложность одного шага верхнего уровня составляет $O(N)$, а полная сложность построения траектории не превосходит $O(NM)$, где M – число локальных обходов, как правило существенно меньше N . Паттерн обхода одиночного препятствия имеет постоянную сложность $O(1)$; паттерн обхода группы препятствий включает проекции, объединение многоугольников и сечения препятствий и оценивается как $O(N)$.

Выводы. Разработана методология обработки облаков точек LiDAR, основанная на классическом конвейере последовательных этапов (воксельное прореживание, выделение плоскости земли методом RANSAC, кластеризация DBSCAN, построение ограничивающих параллелепипедов). Реализованный программный модуль формирует структуру выходных данных, содержащую характеристики обнаруженных объектов (кластеры и параметры bounding boxes), что обеспечивает основу для последующих модулей интерпретации и планирования.

Разработан и исследован эвристический алгоритм локальной оптимизации траектории движения БВС в трёхмерной среде с препятствиями, аппроксимированными ориентированными параллелепипедами. Предложенный алгоритм основан на использовании геометрических паттернов обхода препятствий, позволяющих формировать корректную траекторию без применения итерационных методов оптимизации и дискретизации пространства состояний.

Результаты моделирования подтвердили высокое быстродействие: при увеличении числа препятствий до нескольких сотен время построения локальной траектории не превышает долей секунды. Все вычислительные этапы имеют линейную оценку сложности по числу препятствий и не требуют итерационных процедур.

Благодарности. 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. Lee S., An S., Kim J., et al. Grid-Based DBSCAN Clustering Accelerator for LiDAR's Point Cloud // *Electronics*. – 2024. – Vol. 13, No. 17. – P. 3395.
2. Lyu W., Ke W., Sheng H., et al. Dynamic Downsampling Algorithm for 3D Point Cloud Map Based on Voxel Filtering // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14, No. 8. – P. 3160.
3. Xu Y., So Y., Woo S. Plane Fitting in 3D Reconstruction to Preserve Smooth Homogeneous Surfaces // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, No. 23. – P. 9391.
4. Wang J., Ding J., Guo H., et al. Mask OBB: A Semantic Attention-Based Mask Oriented Bounding Box Representation for Multi-Category Object Detection in Aerial Images // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11, No. 24. – P. 2930.
5. Seidaliyeva U., Ilipbayeva L., Utebayeva D., et al. LiDAR Technology for UAV Detection: From Fundamentals and Operational Principles to Advanced Detection and Classification Techniques // *Sensors*. – 2025. – Vol. 25, No. 9. – P. 2757.
6. Дююн И.А., Дююн Т.А., Рыбак Л.А. Моделирование динамики движения группы дронов с применением открытой платформы gum-pybullet-drones // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. – 2025. – № 5. – С. 137-148.
7. Rybak L.A., Pisarenko A.S., Polyakov V.M. Synthesis of a High-Level Controller for Controlling a Group of Uavs in the Gazebo Simulation Environment // *Proceedings 2025 International Conference on Industrial Engineering Applications and Manufacturing*. – 2025. – P. 489-494.
8. Cherkasov V.V., Malyshev D.I., Rybak L.A. Method for localization and trajectory planning of a robotic system based on autonomous vehicles for smart farming // *Aip Conference Proceedings*. – 2025. – Vol. 3205, No. 1: 080002.
9. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs // *Numerische Mathematik*. – 1959. – Vol. 1, No. 1. – P. 269-271. – DOI: 10.1007/BF01386390.
10. Wang K., Meng Z., Wang Z., Wu Z. A trajectory generation method for multi-rotor UAV based on adaptive adjustment strategy // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, No. 6. – 3435. – DOI: 10.3390/app13063435.
11. LaValle S.M. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning: Tech. Rep. TR-98-11. – Ames: Iowa State University, Computer Science Department, 1998.
12. LaValle S.M., Kuffner J.J. Randomized kinodynamic planning // *The International Journal of Robotics Research*. – 2001. – Vol. 20, No. 5. – P. 378-400. – DOI: 10.1177/02783640122067453.
13. Липанов И.Д., Хомоненко А.Д. Технологии и методы планирования перемещения БПЛА по маршрутным точкам // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. – 2024. – № 3 (39). – С. 30-43. – DOI: 10.20295/2413-2527-2024-339-30-43.
14. Debnath D., Vanegas F., Sandino J., Hawary A.F., Gonzalez F. A review of UAV path-planning algorithms and obstacle avoidance methods for remote sensing applications // *Remote Sensing*. – 2024. – Vol. 16, No. 21. – Art. 4019. – DOI: 10.3390/rs16214019.
15. Liu M., Zhang H., Yang J., Zhang T., Zhang C., Bo L. A path planning algorithm for three-dimensional collision avoidance based on potential field and B-spline boundary curve // *Aerospace Science and Technology*. – 2024. – Vol. 144. – 108763. – DOI: 10.1016/j.ast.2023.108763.
16. Kay T.L., Kajiya J.T. Ray tracing complex scenes // *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. – 1986. – Vol. 20. – P. 269-278.
17. Xiao B., Wan L., Han X., Xi Z., Ding C., Li Q. Addressing Local Minima in Path Planning for Drones with Reinforcement Learning-Based Vortex Artificial Potential Fields // *Machines*. – 2025. – Vol. 13. – Art. 600.
18. Miao F. Improved artificial potential field method for local minima // *Applied and Computational Engineering*. – 2023. – Vol. 10. – P. 47-54.
19. Kim J., Park S., Lee W., Kim W., Doh N., Nam C. Escaping Local Minima: Hybrid Artificial Potential Field with Wall-Follower for Decentralized Multi-Robot Navigation. – 2024.
20. Bai Z. Local minimum enhanced artificial potential field method // *Applied and Computational Engineering*. – 2023. – Vol. 10. – P. 150-158.

REFERENCES

1. Lee S., An S., Kim J., et al. Grid-Based DBSCAN Clustering Accelerator for LiDAR's Point Cloud, *Electronics*, 2024, Vol. 13, No. 17, pp. 3395.
2. Lyu W., Ke W., Sheng H., et al. Dynamic Downsampling Algorithm for 3D Point Cloud Map Based on Voxel Filtering, *Applied Sciences*, 2024, Vol. 14, No. 8, pp. 3160.
3. Xu Y., So Y., Woo S. Plane Fitting in 3D Reconstruction to Preserve Smooth Homogeneous Surfaces, *Sensors*, 2022, Vol. 22, No. 23, pp. 9391.
4. Wang J., Ding J., Guo H., et al. Mask OBB: A Semantic Attention-Based Mask Oriented Bounding Box Representation for Multi-Category Object Detection in Aerial Images, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 24, pp. 2930.

5. Seidaliyeva U., Ilipbayeva L., Utebayeva D., et al. LiDAR Technology for UAV Detection: From Fundamentals and Operational Principles to Advanced Detection and Classification Techniques, *Sensors*, 2025, Vol. 25, No. 9, pp. 2757.
6. Duiyun I.A., Duiyun T.A., Rybak L.A. Modelirovanie dinamiki dvizheniya gruppy dronov s primeneniem otkrytoy platformy gym-pybullet-drones [Modeling the dynamics of a group of drones using the open platform gym-pybullet-drones], *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov], 2025, No. 5, pp. 137-148.
7. Rybak L.A., Pisarenko A.S., Polyakov V.M. Synthesis of a High-Level Controller for Controlling a Group of Uavs in the Gazebo Simulation Environment, *Proceedings 2025 International Conference on Industrial Engineering Applications and Manufacturing*, 2025, pp. 489-494.
8. Cherkasov V.V., Malyshev D.I., Rybak L.A. Method for localization and trajectory planning of a robotic system based on autonomous vehicles for smart farming, *Aip Conference Proceedings*, 2025, Vol. 3205, No. 1: 080002.
9. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, 1959, Vol. 1, No. 1, pp. 269-271. DOI: 10.1007/BF01386390.
10. Wang K., Meng Z., Wang Z., Wu Z. A trajectory generation method for multi-rotor UAV based on adaptive adjustment strategy, *Applied Sciences*, 2023, Vol. 13, No. 6, 3435. DOI: 10.3390/app13063435.
11. LaValle S.M. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning: Tech. Rep. TR-98-11. Ames: Iowa State University, Computer Science Department, 1998.
12. LaValle S.M., Kuffner J.J. Randomized kinodynamic planning, *The International Journal of Robotics Research*, 2001, Vol. 20, No. 5, pp. 378-400. DOI: 10.1177/02783640122067453.
13. Lipanov I.D., Khomonenko A.D. Tekhnologii i metody planirovaniya peremeshcheniya BPLA po marshrutnym tochkam [Technologies and methods for planning the movement of UAVs along route points], *Intellektual'nye tekhnologii na transporte* [Intelligent Technologies in Transport], 2024, No. 3 (39), pp. 30-43. DOI: 10.20295/2413-2527-2024-339-30-43.
14. Debnath D., Vanegas F., Sandino J., Hawary A.F., Gonzalez F. A review of UAV path-planning algorithms and obstacle avoidance methods for remote sensing applications, *Remote Sensing*, 2024, Vol. 16, No. 21, Art. 4019. DOI: 10.3390/rs16214019.
15. Liu M., Zhang H., Yang J., Zhang T., Zhang C., Bo L. A path planning algorithm for three-dimensional collision avoidance based on potential field and B-spline boundary curve, *Aerospace Science and Technology*, 2024, Vol. 144, 108763. DOI: 10.1016/j.ast.2023.108763.
16. Kay T.L., Kajiya J.T. Ray tracing complex scenes, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1986, Vol. 20, pp. 269-278.
17. Xiao B., Wan L., Han X., Xi Z., Ding C., Li Q. Addressing Local Minima in Path Planning for Drones with Reinforcement Learning-Based Vortex Artificial Potential Fields, *Machines*, 2025, Vol. 13, Art. 600.
18. Miao F. Improved artificial potential field method for local minima, *Applied and Computational Engineering*, 2023, Vol. 10, pp. 47-54.
19. Kim J., Park S., Lee W., Kim W., Doh N., Nam C. Escaping Local Minima: Hybrid Artificial Potential Field with Wall-Follower for Decentralized Multi-Robot Navigation, 2024.
20. Bai Z. Local minimum enhanced artificial potential field method, *Applied and Computational Engineering*, 2023, Vol. 10, pp. 150-158.

Рыбак Лариса Александровна – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; e-mail: rl_bgtu@intbel.ru; г. Белгород, Россия; д.т.н.; профессор кафедры технологии машиностроения; главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН.

Дуюн Иван Александрович – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; e-mail: duyun77@mail.ru; г. Белгород, Россия; тел.: 89087828422; аспирант кафедры технологии машиностроения.

Черкасов Владислав Витальевич – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; e-mail: labbgtugos@gmail.com; г. Белгород, Россия; тел.: +79805253793; м.н.с.

Волошкин Артем Александрович – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; e-mail: voloshkin.artem.a@gmail.com; г. Белгород, Россия; тел. +79524349277; к.т.н.; м.н.с.

Дуюн Татьяна Александровна – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; e-mail: tanduun@mail.ru; г. Белгород, Россия; тел.: 89202028298; д.т.н.; доцент; зав. кафедрой технологии машиностроения.

Rybak Larisa Alexandrovna – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: rl_bgtu@intbel.ru; Belgorod, Russia; dr. of eng. sc.; professor of the Department of Mechanical Engineering Technology; chief researcher at the Federal Research Center "Informatics and Control" of the Russian Academy of Sciences.

Duen Ivan Alexandrovich – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: duyun77@mail.ru; Belgorod, Russia; phone: +79087828422; postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering Technology.

Cherkasov Vladislav Vital'evich – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, e-mail: labbgugos@gmail.com; Belgorod, Russia; phone: +79805253793; junior researcher.

Voloshkin Artem Alexandrovich – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: voloshkin.artem.a@gmail.com; Belgorod, Russia; phone: +79524349277; cand. of eng. sc.; junior researcher an employee.

Dunin Tatyana Alexandrovna – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: tanduun@mail.ru; Belgorod, Russia; phone: +79202028298; dr. of eng. sc.; associate professor; head Department of Mechanical Engineering Technology.

УДК 004.021

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-45-59

А.И. Савельев, А.В. Рябинов, А.В. Семенов

МОДЕЛИ БЕСШОВНОГО СЕТЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУППЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ БПЛА

Внедрение групп беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в точное земледелие сдерживается рядом проблем, относящихся к устойчивости связи на удаленных от точки взлета участках и зависимостью от погодных условий, которые могут снижать эффективность применения технологии. Существующие модели планирования недостаточно адаптивны к динамическим изменениям агросреды, проблемам связи и в большинстве случаев предполагают строгое следование фиксированным траекториям. Целью данного исследования является разработка концептуальных моделей бесшовного функционирования и системы связи для координации группы сельскохозяйственных БПЛА. В работе представлена диаграмма связанности элементов системы, которая обеспечивает непрерывность процессов от инициализации до автоматической замены аккумуляторов и дозаправки БПЛА. Разработана модель связи системы с узлом ретрансляции, разделяющая трафик, что позволяет исключать коллизии и стабилизировать обмен данными на дистанциях свыше 2,5 км. Представлен способ распределения задач с учетом энергообеспечения и пространственных координат БПЛА, который позволяет динамически перераспределять нагрузку при отказах. Предложенные решения повышают автономность и отказоустойчивость группы БПЛА, минимизируют участие оператора и обеспечивают безопасное выполнение миссий в условиях недетерминированной среды. Апробация предложенной модели, выполненная в лабораторных и полевых условиях, показала устойчивое функционирование при передаче данных на дальних дистанциях и при групповом режиме работы. Отдельно подтверждено отсутствие коллизий при обмене данными между БПЛА, что свидетельствует о корректности разделения трафика и эффективности выбранной архитектуры связи. Полученные результаты подтверждают возможность практического применения разработанных моделей для повышения автономности и непрерывности выполнения сельскохозяйственных работ. Разработанные решения также демонстрируют потенциал масштабирования, что расширяет область их применения в задачах точного земледелия.

Беспилотные летательные аппараты; точное земледелие; бесшовное функционирование; группа БПЛА; модель связи; распределение задач; узел ретрансляции.

A.I. Saveliev, A.V. Ryabinov, A.V. Semenov

MODELS OF SEAMLESS OPERATION OF A GROUP OF AGRICULTURAL UAVS

The introduction of groups of unmanned aerial vehicles (UAVs) into precision farming is hampered by several problems related to the stability of communications in areas remote from the take-off point and dependence on weather conditions, which can reduce the effectiveness of the technology. Existing planning models are insufficiently adaptive to dynamic changes in the agricultural environment, communication problems, and in

most cases assume strict adherence to fixed trajectories. The purpose of this study is to develop conceptual models of seamless operation and a communication system for coordinating a group of agricultural UAVs. The paper presents a diagram of the connectivity of the system elements, which ensures the continuity of processes from initialization to automatic battery replacement and UAV refueling. A communication model of the system with the relay node has been developed that separates traffic, which makes it possible to eliminate collisions and stabilize data exchange over distances of more than 2.5 km. A method for distributing tasks, considering the energy supply and spatial coordinates of the UAV, is presented, which allows dynamically redistributing the load in case of failures. The proposed solutions enhance the autonomy and fault tolerance of the UAV group, minimize operator involvement, and ensure safe mission performance in a non-deterministic environment. The approbation of the proposed model, performed in laboratory and field conditions, showed its stability when transmitting data over extended distances and in group operation. The absence of collisions during data exchange between UAVs has been separately confirmed, which indicates the correctness of traffic separation and the effectiveness of the chosen communication architecture. The results obtained confirm the possibility of practical application of the developed models to increase the autonomy and continuity of agricultural work. The developed approach also demonstrates the potential for scaling, which expands the scope of its application in precision farming tasks.

Unmanned aerial vehicles; precision farming; seamless operation; UAV group; communication model; task allocation; relay node.

Введение. Развитие агропромышленного производства и реализация концепции точного земледелия стимулируют активное внедрение цифровых и роботизированных технологий. Среди них применение БПЛА сельскохозяйственного назначения занимает особое место, как гибкий и экономически эффективный способ мониторинга и обработки растений и почвы [1–4]. Ключевым преимуществом данных аппаратов является возможность работы на труднодоступных участках со сложным рельефом без необходимости создания масштабной наземной инфраструктуры, а также низкая стоимость и вариативность при проведении работ.

Эффективность полевых миссий в значительной степени зависит от погодных условий, таких как температура окружающей среды, наличие и интенсивность осадков, скорость и направление ветра, а также влажность воздуха, что обуславливает жесткие временные рамки для проведения большинства сельскохозяйственных операций. Кроме того, высокая влажность почвы, формирующаяся в результате длительных осадков, существенно ограничивает мобильность наземной агротехники из-за снижения несущей способности грунта и рисков нарушения его агрофизических свойств. В данном контексте сельскохозяйственные БПЛА предоставляют возможность оперативного проведения работ в краткосрочные временные окна с благоприятными погодными условиями. Однако для реализации этого потенциала требуется максимальное упрощение и автоматизация процессов подготовки и обслуживания группы БПЛА, с сокращением простоев между вылетами в течение рабочей смены.

Существенным фактором, ограничивающим применение сельскохозяйственных БПЛА, является удаленность полей от баз их технического обслуживания. Низкое качество полевых дорог значительно увеличивает время перемещения техники. Выезд на позицию и возвращение с нее могут занимать несколько часов, что делает нерациональным проведение кратковременных работ посредством аппаратов указанного типа. Кроме того практическое применение групп сельскохозяйственных БПЛА сдерживается отсутствием моделей, обеспечивающих их непрерывное согласованное функционирование в условиях удаленности от базы, ограничений радиосвязи и необходимости оперативной замены аппаратов без остановки выполнения миссии. Существующие подходы, как правило, ориентированы на фиксированное планирование отдельных маршрутов и демонстрируют ограниченную устойчивость обмена данными при увеличении радиуса рабочей зоны. Таким образом, эффективная эксплуатация БПЛА требует обеспечения длительной автономной работы непосредственно в границах обрабатываемых площадей.

Научная новизна работы заключается в разработке новой модели организации группового функционирования сельскохозяйственных БПЛА, а также в усовершенствовании подходов к координации и обмену данными за счёт введения двухканальной схемы взаимодействия с промежуточным узлом ретрансляции, что позволяет устранить коллизии при доступе к радиоканалу.

Обзор существующих подходов. Современное сельское хозяйство активно применяет БпЛА для мониторинга посевов [5, 6], картографирования местности [7, 8], агрохимической обработки [9], оценки урожайности и анализа состояния полей [10]. Чем больше БпЛА работает одновременно и сложнее становится организация воздушного движения, тем выше требований к слаженному взаимодействию групп агентов. Когда множество аппаратов выполняют различные задачи в одном воздушном пространстве, критически важно обеспечить их пространственную координацию и предотвратить столкновения на пересекающихся маршрутах.

При выполнении сельскохозяйственных операций БпЛА работают в условиях плотной загрузки выделенного воздушного пространства, жестких временных рамок для выполнения задач и ограниченной вычислительной мощности бортовых систем [11]. Кроме того, в реальной эксплуатации на выполнение полётных заданий влияют внешние природные воздействия, такие как неустойчивые погодные условия – в частности, порывистый ветер способен отклонить фактическую траекторию движения БпЛА от запланированной, и внутренние технические отклонения, включающие погрешности телеметрии, сбои навигационных систем, временные потери связи с наземной станцией и отказы отдельных аппаратов. В связи с этим, маршруты миссий должны обеспечивать безопасность движения и исключение конфликтов между аппаратами в условиях прерывистой связи с центром управления, одновременно компенсируя навигационные ошибки при возможных отклонениях от запланированного курса.

Существующие методы и алгоритмы многоагентного планирования обеспечивают различный уровень оптимальности, но, как правило, не адаптированы к требованиям и ограничениям практической эксплуатации в аграрной отрасли.

Алгоритм Conflict-Based Search (CBS) [12] и его производные формируют маршруты путём централизованного разрешения конфликтов между агентами в пространственно-временной области через построение дерева конфликтов. Хотя базовый CBS обеспечивает оптимальность решения, он также предполагает дискретное пространственно-временное планирование и строгое следование фиксированным траекториям, что делает его непригодным для прямого применения в реальных сценариях с БпЛА [13]. Такие алгоритмы не предусматривают отклонений от запланированного поведения – при выходе одного БпЛА из строя или сдвига его траектории возникает риск несогласованности с действиями других агентов, что может потребовать полной переработки конфигурации маршрутов для сохранения безопасности.

Модификация алгоритма для работы с непрерывным временем – Continuous-time CBS (CCBS) [14], также имеет вычислительные ограничения при масштабировании и требует учёта физических характеристик и динамических параметров реальных летательных аппаратов.

Алгоритм Multi-Conflict-Based Search (MCBS) [15] показывает, что при росте числа агентов и плотности взаимодействий структура дерева конфликтов значительно усложняется. Количество возможных ветвлений растёт экспоненциально, что ограничивает применимость метода в сценариях с высокой насыщенностью полётов, особенно при необходимости учёта трёхмерного пространства и временных ограничений.

Алгоритм Multi-Agent Rapidly-Exploring Random Tree* (MA-RRT*) [16] осуществляет поиск траекторий в объединённом конфигурационном пространстве размерности R^3 , где m – число агентов. Базовый алгоритм Rapidly-Exploring Random Tree* (RRT*) [17] представляет собой стохастический подход выборочного построения деревьев, обеспечивающий асимптотическую сходимость к оптимальному решению. В многоагентной версии данная стратегия теоретически сохраняет глобальную сходимость, однако сталкивается с проклятием размерности – объём пространства поиска растёт экспоненциально с увеличением числа агентов. Кроме того, MA-RRT* предполагает точное выполнение заранее построенных траекторий и не учитывает внешние отклонения – например, сбои навигации, воздействие ветра или ошибки телеметрии. При отказе одного БпЛА или отклонении от плана нарушается согласованность всей конфигурации, что требует пересчёта маршрутов группы в целом.

Централизованные эвристические алгоритмы, такие как Cooperative A*, использующий приоритетное планирование и эвристики расстояния для координации агентов [18], и Enhanced Conflict-Based Search (ECBS), применяющий фокальный поиск и ограниченную субоптимальность для ускорения разрешения конфликтов [19], сокращают объем вычислений при планировании маршрутов. Данные подходы эффективны при фиксированном составе группы БПЛА и статичной среде, но не обладают устойчивостью к навигационным ошибкам и вынуждены инициировать глобальное перепланирование при незначительных отклонениях агентов от заданных траекторий.

Реактивные алгоритмы, такие как Optimal Reciprocal Collision Avoidance (ORCA) [20] и Reciprocal Velocity Obstacles (RVO) [21], обеспечивают локальное предотвращение столкновений через корректировку векторов скорости в реальном времени без явной коммуникации между агентами. Однако данные подходы критически зависят от точности локализации и предполагают надёжное измерение скоростей окружающих агентов. Они особенно чувствительны к накапливающимся погрешностям навигации. Ошибки в определении относительных положений и скоростей приводят к неэффективным или потенциально опасным траекториям. При временных сбоях в измерениях или задержках обновления телеметрии эти алгоритмы не имеют механизмов компенсации, что ограничивает их применение в условиях нестабильной связи и требует постоянной высокоточной локализации для безопасного функционирования.

Поведенческие и децентрализованные подходы, включая модели на основе потенциальных полей (Artificial Potential Field, APF) [22], алгоритмы имитации поведения роя (Boids, Cucker-Smale model) [23, 24], а также алгоритмы альтернативной коллективной адаптации [25] и роевого управления с элементами кластерного анализа [26] обладают высокой адаптивностью и подходят для работы в частично наблюдаемых или слабо структурированных средах. Однако такие методы, как правило, требуют тонкой эмпирической настройки параметров, их поведение сложно предсказать в новых условиях, а маршруты формируются в процессе исполнения, а не заранее. Это затрудняет проверку надёжности, воспроизводимости и безопасности движения до начала полёта.

Проведённый обзор современных исследований позволил выявить ряд ограничений и нерешённых проблем в существующих подходах. Для наглядного представления основных характеристик и недостатков рассмотренных методов их сравнительный анализ приведён в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ существующих методов и их недостатки

Метод	Маршрутные ограничения	Отказоустойчивость	Масштабируемость	Требование тонкой настройки	Зависимость от внешних условий	Требования к качеству связи
CBS [12, 13]	Да	Нет	Да	Нет	Нет	Нет
CCBS [14]	Нет	Да	Нет	Да	Нет	Нет
MCBS [15]	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
MA-RRT [16], RRT [17]	Да	Нет	Да	Нет	Нет	Нет
Cooperative A [18], ECBS [19]	Нет	Нет	Ограничено	Нет	Да	Нет
Реактивные алгоритмы (ORCA, RVO) [20, 21]	Нет	Да	Да	Нет	Нет	Да
Децентрализованные подходы [22-26]	Да	Да	Да	Да	Да	Нет

Ввиду выявленных недостатков существующих методов, таких как следование фиксированным траекториям, ограничения по масштабируемости, зависимость от внешних условий и высокие требования к качеству связи, актуальной является задача разработки модели бесшовного функционирования группы сельскохозяйственных БПЛА, обеспечивающей непрерывность выполнения миссии, устойчивую связь на удаленных участках поля, динамическое перераспределение задач между аппаратами и возможность автоматического восстановления работоспособности системы при отказе отдельных БПЛА.

Модель связанности элементов бесшовной системы. В рамках исследования разработана диаграмма связанности, которая отражает топологическую и функциональную взаимосвязь ключевых элементов бесшовной системы функционирования группы сельскохозяйственных БПЛА в условиях недетерминированной агросреды.

На рис. 1 группа БПЛА выступает в качестве основной части системы, осуществляющая взаимодействие с другими компонентами. Функционирование представленной системы охватывает этапы от инициализации и планирования до завершения миссии и подготовки к следующему циклу, обеспечивая непрерывность, автономность и устойчивую связь при выполнении всех операций.

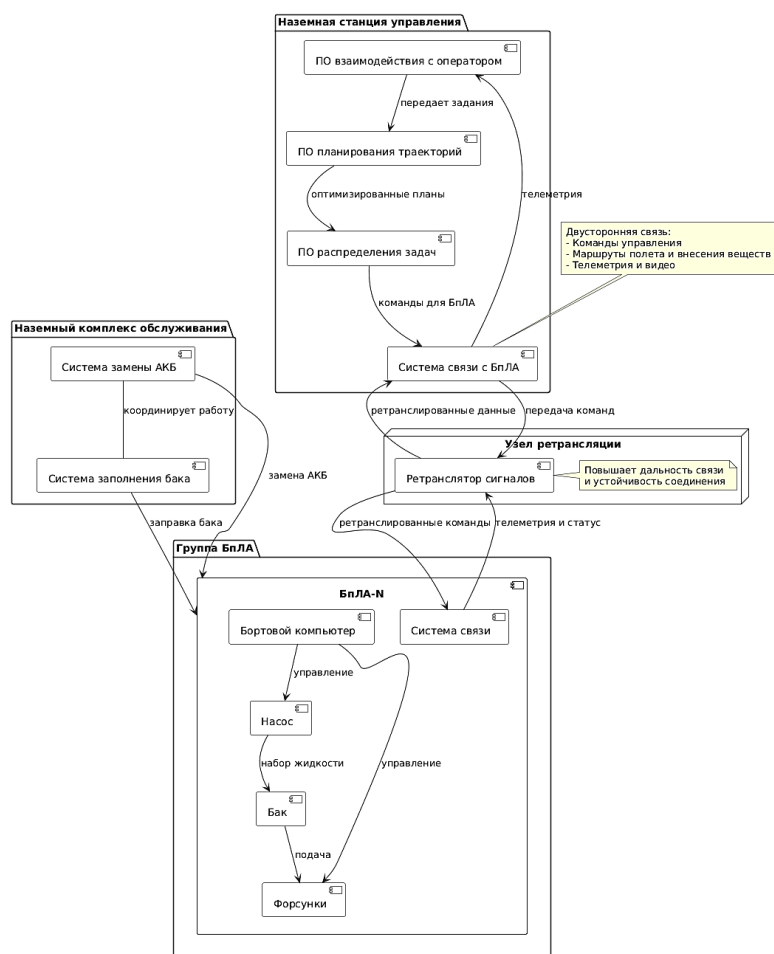


Рис. 1. Связанность элементов бесшовной системы функционирования

Процесс начинается с инициализации программного обеспечения наземной станции, после чего система функционирования проводит комплексную диагностику. На первом шаге проверяется связь с узлом ретрансляции, опрашивается состояние всех БПЛА, включая уровень заряда аккумуляторных батарей, объем рабочего раствора и исправность бортового оборудования. Затем подтверждается готовность наземного комплекса обслуживания.

На основе полученных данных оператор формулирует задачу, задавая геометрию целевой области, агрохимические параметры – тип препарата, норму внесения, высоту полета, и ограничения миссии, в том числе временные рамки, запретные зоны. ПО планирования траекторий анализирует доступные ресурсы, количество и характеристики БПЛА, и с учетом геометрии поля формирует энергоэффективные маршруты, распределяя зоны работы между аппаратами.

Сформированные индивидуальные задания передаются на борт каждого БпЛА группы через канал связи, усиленный промежуточным узлом ретрансляции, после чего аппараты подтверждают готовность к выполнению.

В ходе выполнения миссии БпЛА осуществляют координированный взлёт, занимают расчётные позиции и следуют по назначенным траекториям с постоянной коррекцией курса по данным глобальной навигационной спутниковой системы и бортовых датчиков. По достижении зоны внесения активируется распыляющее оборудование: бортовой вычислитель управляет насосом, обеспечивающим подачу рабочего раствора из бака к форсункам, которые формируют аэрозоль с заданной дисперсностью. Расход жидкости контролируется в режиме реального времени. БпЛА обмениваются данными о прогрессе выполнения, а наземная станция при необходимости перераспределяет зоны ответственности в случае исчерпания ресурсов или технических отклонений.

Параллельно осуществляется непрерывный мониторинг состояния каждого БпЛА – через узел ретрансляции передаётся телеметрия, включающая текущие координаты, остатка заряда и раствора, а также статус оборудования и параметры миссии. На основе полученных данных алгоритмы на наземной станции прогнозируют необходимость в обслуживании и обеспечивают ротацию агентов группы. При подходе к пороговым значениям ресурсов система определяет оптимальный момент для возвращения БпЛА на обслуживание, формирует маршрут возврата и назначает замену из резерва или перераспределяет нагрузку. По прибытии на площадку наземный комплекс автоматически фиксирует аппарат, заменяет аккумулятор и производит дозаправку бака требуемым рабочим раствором до заданного уровня, после чего БпЛА возвращается в состав группы.

Ключевую роль в обеспечении устойчивости взаимодействия играет узел ретрансляции, который устанавливает и поддерживает канал связи между наземной станцией и группой БпЛА. Он агрегирует данные телеметрии от всех аппаратов и ретранслирует команды управления, обеспечивая надёжную передачу информации в том числе и при значительном удалении или наличии радиотеневых зон. По завершении обработки система инициирует возврат всех аппаратов, формирует очередь посадки и проводится послеполётная диагностика. В ходе диагностики собираются и анализируются данные о выполненной работе: обработанная площадь, израсходованные ресурсы, длительность миссии, выявленные аномалии, после чего на их основе формируется отчёт для оператора. Завершающий этап включает полное техническое обслуживание группы: зарядка аккумуляторов, заправка баков, калибровка оборудования и, при необходимости, обновление программного обеспечения, что обеспечивает готовность системы к выполнению следующей миссии.

Представленная диаграмма демонстрирует сквозную, интегрированную модель взаимодействия программных и аппаратных компонентов, реализующую принципы бесшовного функционирования – непрерывности, автономности, адаптивности и минимального участия человека на всех этапах цикла миссии. Предложенная модель также служит теоретической основой для последующего синтеза алгоритмов распределённого управления, а также инструментом верификации архитектурной согласованности технических решений, разрабатываемых в ходе исследования.

Модель функционирования системы связи группы БпЛА для распределения и назначения задач. Для обеспечения бесшовной коммуникации между агентами была разработана модель связи, которая обеспечивает устойчивую передачу данных и команд управления между БпЛА и наземной станцией. Широко отмечается [27] значительное снижение качества связи при удалении сельскохозяйственного аппарата на расстояние свыше 2 км от точки взлёта, а на дистанциях, превышающих 2,5 км, канал становится нестабильным ввиду чего не обеспечивает корректное распределение задач между агентами группы из-за возможного наличия препятствий и неоднородности местности. В данном случае информирование оператора о состоянии БпЛА может отсутствовать, что оказывает влияние на качество и безопасность работы группы в целом.

Существующие схемы прямой связи между БпЛА демонстрируют ограниченную эффективность при групповом применении [28]. Данные решения не обеспечивают полноценного взаимодействия агентов, лишены механизмов межаппаратного обмена данными

ми и не обладают масштабируемостью при увеличении числа аппаратов в группе. Это в свою очередь препятствует реализации распределённого управления и снижает устойчивость системы в условиях сельскохозяйственных работ.

С целью устранения выявленных ограничений архитектура системы связи БпЛА была сформирована для решения следующих проблем:

- ◆ исключение конкуренции между агентами за один канал для передачи данных;
- ◆ разделение потоков обмена между наземной станцией, промежуточным узлом и функционирующими аппаратами;
- ◆ обеспечение устойчивой передачи данных в условиях неоднородного рельефа и препятствий для группы БпЛА;
- ◆ сохранение совместимости с используемыми в проекте аппаратными решениями связи.

В качестве решения предложена модель обмена данными через промежуточный узел ретрансляции, который выполняет функцию разграничения трафика между компонентами системы. Данная архитектура предполагает наличие двух независимых каналов, что позволяет изолировать потоки информации, устранить конкуренцию за радиоресурс и исключить блокировку сообщений, характерную для одноканальных схем связи:

1) Канал «наземная станция – промежуточный узел» обеспечивает передачу данных между наземной станцией и ретранслятором. В данном случае трафик канала включает: служебные данные управления, параметры обмена и сообщения автопилота.

2) Канал «промежуточный узел – рабочие БпЛА» обеспечивает обмен данными внутри группы БпЛА и позволяет подключать несколько аппаратов без ухудшения качества.

Промежуточный узел осуществляет функцию межканального шлюза, выполняя ретрансляцию служебных сообщений между независимыми каналами. Потоки данных, поступающие от сельскохозяйственного БпЛА, перенаправляются в канал связи с наземной станцией, а управляющие сигналы и сообщения телеметрии от наземной станции управления (НСУ) – в обратном направлении, к аппарату (рис. 2).

Предложенная модель основана на функциональном и физическом разделении коммуникационных каналов. Промежуточный узел для реализации модели должен быть оснащен двумя независимыми радиомодулями, каждый из которых функционирует в собственном режиме обмена, при этом каналы не разделяют общий эфир и изолированы друг от друга. Маршрутизация служебных сообщений осуществляется программным обеспечением вычислителя промежуточного узла, который транслирует входящие данные без изменения их формата и объединения потоков. Канал связи между наземной станцией и промежуточным узлом работает в режиме одиночного обмена, тогда как канал между промежуточным узлом и рабочими БпЛА реализован в режиме группового обмена. Необходимо отметить, что параметры скорости в обоих каналах подбираются с учётом нагрузки и адаптивности к трафику для достижения устойчивости обмена данными.



Рис. 2. Модель организации групповой передачи данных

Логика распределения задач между агентами группы строится на последовательной обработке данных, получаемых от всех БПЛА. На этапе инициализации каждый из них устанавливает связь с НСУ и передаёт исходные параметры своего состояния. Далее осуществляется оценка доступных ресурсов и задач, после чего наземная станция формирует множество задач. Алгоритм выбора исполнителя основан на анализе параметров энергообеспечения, пространственных координат, доступной полезной нагрузки и оценке временных затрат на движение к точке выполнения задачи. Назначение задач происходит с учетом минимизации совокупных временных потерь и максимизации общей эффективности выполнения миссии.

Важной особенностью предложенной модели функционирования является механизм поддержания работоспособности группы в целом. На основе обмена сообщениями о состоянии и ресурсах с наземной станцией посредством БПЛА-ретранслятора принимаются решения о временной смене ведущего аппарата, перераспределении задач и выборе альтернативных траекторий движения. Такой подход обеспечивает отказоустойчивость группового поведения даже при частичной деградации прямых каналов связи. Исходя из принимаемых данных НСУ способна выполнить корректировку принятого к исполнению задания, сформировать уточняющие указания либо принять решение о перераспределении задач между БПЛА группы. В случае отказов или критических отклонений от маршрутов выполняются аварийные процедуры, включая переход в безопасный режим или возврат агента к точке базирования.

Предложенная модель связи опирается на сочетание централизованного управления и механизма самокоординации, что позволяет обеспечить высокую устойчивость группового функционирования. Новизна предложенного решения заключается в многоуровневой организации каналов связи, а также интеграции распределённого механизма выбора исполнителя задач, повышающего адаптивность и автономность группы БПЛА в условиях ограниченной или частично деградировавшей связи.

Материалы и методы. В рамках представленной работы испытания выполнялись на комплекте радиомодулей RFDesign RFD900, который был выбран в качестве базового средства обмена данными в составе группы БПЛА. Данные радиомодули обеспечивают одиночный и групповой обмен, а также поддерживают режим, заявленный производителем как обмен с включением промежуточного узла-ретранслятора. Наличие указанных режимов является основанием для выбора обсуждаемого оборудования с целью разработки канала связи в мультиагентной среде. На уровне данных ретрансляция осуществляется средствами программного обеспечения полетного контроллера, которое поддерживает пересылку служебных сообщений между подключёнными радиомодулями. В многоканальной конфигурации входящие данные могут быть направлены на другие радиомодули, что обеспечивает их программируемую ретрансляцию. Рассмотренный принцип работает в рамках выбранного режима радиоканала и использует те же особенности доступа к общему коммуникационному ресурсу, что и в одноканальной конфигурации.

В рамках лабораторных и полевых испытаний использовался единый показатель качества передачи данных, рассчитываемый по отношению доставленных пакетов к суммарному числу отправленных. Показатель определяется выражением:

$$Q = \frac{N_{\text{recv}}}{N_{\text{recv}} + N_{\text{lost}}} \times 100\%,$$

где N_{recv} – число успешно принятых пакетов; N_{lost} – число потерянных или повреждённых пакетов.

Для сравнительного анализа в лабораторных условиях проводятся испытания четырех схем взаимодействия, доступных в штатном функционале рассматриваемого оборудования:

1) Обмен один к одному (базовые параметры): содержит один ведущий модуль и одно ведомое устройство, при этом обмен данными выполняется по прямому каналу.

2) Обмен один к одному при повышенной скорости: включает один ведущий модуль и одно ведомое устройство, а параметры скорости увеличиваются для оценки поведения канала при повышенной нагрузке.

3) Групповой режим: обладает одним ведущим модулем и двумя (или более) ведомыми устройствами, использующими общий радиоканал.

4) Групповой режим с промежуточным узлом-ретранслятором: содержит один ведущий модуль, один модуль-ретранслятор и два ведомых устройства; режим соответствует реализации ретрансляции в составе стандартного функционала оборудования.

В рамках сравнительного анализа выполнены лабораторные испытания рассмотренных выше схем взаимодействия в условиях контролируемой внутренней среды при следующих фиксированных параметрах (табл. 2).

Таблица 2

Фиксированные параметры лабораторных испытаний

Параметр	Значение
Расстояние между устройствами	3 м
Высота расположения антенн	1,2 м
Тип видимости между антеннами	прямая
Закрепление устройств	стационарное
Наличие внешних источников радиопомех	отсутствуют

При экспериментах для каждой схемы выполнялись формирование требуемой конфигурации, запуск непрерывного обмена служебной информацией и регистрация следующих показателей:

- ◆ объём принятых данных;
- ◆ объём переданных данных;
- ◆ количество доставленных пакетов;
- ◆ количество потерянных пакетов;
- ◆ максимальный интервал между пакетами;
- ◆ скорость обмена;
- ◆ показатель качества канала.

Результаты лабораторных испытаний представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты лабораторных испытаний в условиях контролируемой внутренней среды

Показатель	Одиночный обмен	Одиночный обмен (повышенная скорость)	Групповой режим	Групповой режим с промежуточным узлом в стандартном (одноканальном) режиме
Объём принятых данных, байт	1 060 000	220 520	835 380	2 080 000
Скорость приёма, байт/с	1 860	843	1 260	1 470
Доставленные пакеты, шт.	34 145	7 490	10 577	68 722
Потерянные пакеты, шт.	145	322	539	432 390
Скорость приёма, пакетов/с	58	28	39	48
Макс. интервал между пакетами, мс	286	587	610	88
Показатель качества канала Q , %	99,6	95,9	95,2	13,7

Результаты экспериментальных исследований показывают, что одиночный режим обмена данными обеспечивает устойчивую связь только при базовых параметрах сеанса. При повышении скорости передачи данных и использовании группового режима наблюдается рост количества потерянных пакетов и увеличение временных интервалов между последовательными передачами. Штатный групповой режим с использованием промежуточного узла-ретранслятора демонстрирует крайне низкую эффективность – значение показателя качества снижается до уровня порядка 14%, сопровождаясь выраженной фрагментацией потока данных, что исключает возможность использования данной схемы для задач группового обмена.

Детальный анализ функционирования указанного режима с промежуточным узлом показывает, что все устройства функционируют в едином радиоканале, при этом промежуточный узел и ведомый аппарат конкурируют за доступ к общему каналу. Реализация ретрансляции выполнена как последовательная передача без механизма арбитража или приоритезации трафика, что приводит к возникновению коллизий и блокировкам. Промежуточное устройство не обладает приоритетом на передачу ранее принятых данных, вследствие чего служебные сообщения не могут быть своевременно переданы. В результате временные интервалы между пакетами увеличиваются более чем в 6 раз относительно одиночного канала и достигают величин порядка 600 мс, что приводит к выраженной фрагментации потока данных и падению качества канала до указанного ранее уровня.

Результаты и обсуждение предлагаемого решения. Лабораторные испытания выполнялись в условиях и по методике, полностью совпадающими с проведёнными ранее тестированиями стандартных схем связи, что обеспечивает сопоставимость результатов и исключает влияние дополнительных факторов на оценку решения.

Промежуточный узел функционирует в двухканальной конфигурации, предусматривающей отдельный канал связи с наземной станцией и независимый канал связи с рабочим БпЛА. Обмен данными между участниками осуществляется последовательно через промежуточный узел, без совместного использования общего радиоресурса. Полученные при экспериментальных исследованиях показатели представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты лабораторных испытаний разработанной модели функционирования

Показатель	Значение
Объём принятых данных, байт	257 950
Скорость приёма, байт/с	531
Доставленные пакеты, шт.	6 304
Потерянные пакеты, шт.	489
Скорость приёма, пакетов/с	18
Макс. интервал между пакетами, мс	495
Показатель качества канала Q , %	92,8

Двухканальная архитектура обеспечивает устойчивый обмен служебной информацией, в рамках которого отсутствует конкуренция устройств за общий радиоканал, а поток данных сохраняет свою равномерность. Экспериментальные результаты приводят к оптимальному результату надёжности: число потерянных пакетов выше, чем в базовом одиночном режиме и в одиночном режиме на повышенной скорости, но ниже, чем в групповом режиме без промежуточного узла. Максимальный интервал между последовательными пакетами при двухканальном групповом режиме меньше, чем при одиночном режиме на повышенной скорости и при групповом режиме без промежуточного узла, однако остаётся больше, чем при базовом одиночном режиме обмена данными. Итоговое значение показателя качества канала составляет 92,8%. Данные результаты сопоставимы с результатами, полученными в режиме прямого одиночного обмена, а также подтверждают высокую устойчивость и эффективность предложенной модели по сравнению с групповым режимом и групповым режимом с промежуточным узлом в стандартном режиме.

Разработанное решение подтверждает работоспособность в условиях лабораторных испытаний и удовлетворяет стандартным требованиям к устойчивости канала связи.

Полевые испытания проводились с целью подтверждения работоспособности предложенной модели обмена данными через промежуточный узел ретрансляции в составе группы БпЛА и оценки устойчивости канала связи на дистанциях, достигающих 5 км.

Прототип БпЛА, выполняющего функцию промежуточного узла канала связи, формируется на базе типовой мультироторной платформы. Конструкция и состав бортового оборудования обеспечивают работу двух независимых каналов обмена информацией и выполнение режима межканальной ретрансляции данных.

Бортовая система связи оснащена двумя радиомодулями, каждый из которых подключён к отдельному интерфейсу полетного контроллера БпЛА и работает в независимом режиме обмена данными: первый модуль обеспечивает связь с наземной станцией, второй – взаимодействие с рабочими беспилотными аппаратами группы.

Радиомодули размещаются по принципу исключения взаимного экранирования и минимизации влияния конструктивных элементов. Антенны устанавливаются на разных точках корпуса БпЛА. Прототип также оснащён автономным питанием радиомодулей и средствами контроля телеметрии, что обеспечивает устойчивое функционирование системы связи при выполнении полётных задач. Внешний вид применяемого БпЛА показан на рис. 3.

Испытания проводились в двух сериях: первая осуществлялась без использования ретранслятора, вторая – с применением БпЛА-ретранслятора, удерживаемого на высоте до 145 м. Прямая видимость между наземной станцией и ретранслятором сохраняется за счёт высоты удержания промежуточного узла, что исключает влияние экранирования рельефа на оценку качества связи. В процессе эксперимента показатель качества связи между рабочим БпЛА и наземной станцией фиксируется в каждой точке полётного задания.

В ходе испытаний первой серии, по прямой схеме связи, зафиксировано устойчивое функционирование канала на ближних точках маршрута, однако при удалении аппарата на расстояние около 2 км наблюдается резкое снижение качества связи. При последующем увеличении дистанции происходит полная потеря соединения с наземной станцией, что делает дальнейшее выполнение миссии невозможным на удалённых точках маршрута.



Рис. 3. Прототип БпЛА с промежуточным узлом связи

Во время второй серии испытаний, проводимых с использованием БпЛА-ретранслятора, обеспечивалась стабильная работа канала связи на всём диапазоне до 5 км. Также отсутствуют длительные разрывы соединения, а на максимальных дистанциях фиксируется лишь постепенное снижение показателя качества до уровня 83%, что остаётся в пределах порога устойчивого обмена и не препятствует корректному выполнению полётного задания. При этом сохраняется надёжное соединение даже после посадки рабочего аппарата в удалённых точках.

Разработанная двухканальная архитектура связи, включающая разделение потоков между наземной станцией, промежуточным узлом и рабочими аппаратами, устраняет ограничения, выявленные при использовании прямой схемы связи. Разделение каналов исключает конкуренцию устройств за общий радиоканал и обеспечивает равномерный поток информации. Экспериментальные исследования демонстрируют показатель качества $Q=92,8-83\%$, характеризующий стабильную передачу информации в двухканальной конфигурации.

Заключение. В представленной работе решена задача повышения эффективности группового применения сельскохозяйственных БпЛА за счет разработки моделей бесшовного функционирования.

В рамках исследования разработаны модели, которые обеспечивают бесшовное взаимодействие группы сельскохозяйственных БпЛА. Первым результатом является модель связанности элементов системы (рис. 1), охватывающая полный жизненный цикл миссии. В отличие от традиционных подходов, рассмотренных в работе, модель интегрирует этапы диагностики, планирования, выполнения и автоматического обслуживания. Ключевой особенностью является механизм ротации аппаратов: при достижении пороговых значений заряда или уровня рабочего раствора система автоматически формирует маршрут возврата и назначает замену, что исключает простои группы.

Вторым результатом стала модель организации групповой передачи данных (рис. 2). Экспериментально выявлено, что стандартные режимы обмена радиомодулей обеспечивают устойчивость канала связи только при ограниченных нагрузках и малом числе узлов. В условиях увеличения количества устройств или увеличении дистанции свыше 2,5 км, формируются конфликты доступа к каналу или снижается показатель качества связи. Предложенная архитектура использует промежуточный узел ретрансляции с двумя независимыми радиомодулями, разделяющими трафик на каналы «наземная станция–ретранслятор» и «ретранслятор–БпЛА». Это устраняет конкуренцию за эфир и коллизии, которые характерны для одноканальных схем. Предложенное разделение повышает надежность доставки команд управления и телеметрии в условиях неоднородного рельефа.

Логика распределения задач построена на централизованном анализе ресурсов с элементами самокоординации. Алгоритм выбора исполнителя учитывает энергообеспечение, координаты и временные затраты, минимизируя совокупные потери. В сравнении с алгоритмами CBS или ORCA, предложенный подход не требует глобального перепланирования при незначительных отклонениях. При этом механизм поддержания работоспособности позволяет группе функционировать даже при частичной деградации каналов связи, обеспечивая отказоустойчивость.

Итоговое значение показателя качества канала в лабораторных условиях составило 92,8%, что сопоставимо с результатами, полученными в режиме прямого одиночного обмена, а также подтверждает высокую устойчивость и эффективность предложенной модели. В полевых условиях устойчивый обмен данными фиксируется на всём диапазоне до 5 км с показателем качества связи не менее 83%.

В отличие от существующих методов, предполагающих использование фиксированных траекторий и ограниченную адаптацию к изменяющимся условиям функционирования, предложенные решения ориентированы на обеспечение непрерывного и согласованного взаимодействия группы БпЛА в условиях динамически изменяющейся среды с учетом ограничений радиосвязи и распределенного характера системы.

Обсуждаемый подход реализован применительно к задачам точного земледелия, где ранее подобные решения в комплексном виде не рассматривались, и подтвержден экспериментальными результатами, демонстрирующими повышение эффективности группового функционирования.

Внедрение предложенных решений способствует оптимизации операционных затрат и автономности системы в условиях недетерминированной агросреды. Предложенное решение так же устраняет ограничения, связанные с дискретным пространственно-временным планированием и необходимостью строгого следования фиксированным траекториям, что повышает его применимость в реальных сценариях эксплуатации БпЛА. Дальнейшие исследования будут направлены на программную реализацию, оценку масштабируемости предложенного решения и работу при отказе работы глобальных навигационных систем одного или нескольких БпЛА.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FFZF-2025-0012 «Теоретические основы и новые технические решения бесшовного управления группой БпЛА в недетерминированных средах при выполнении сельскохозяйственных задач»).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Манохина А.А., Шабанов Н.Э., Чайка В.А. Применение микроэлементов при выращивании картофеля - предпосылки использования дронов // *Агроинженерия*. – 2021. – Т. 4. – С.14-20. – DOI: 10.26897/2687-1149-2021-4-14-20.
2. Sun C., Zhou J., Ma Y., Xu Y., Pan B., Zhang Z. A review of remote sensing for potato traits characterization in precision agriculture // *Frontiers in Plant Science*. – 2022. – Vol. 13. – P. 871859. – DOI: 10.3389/fpls.2022.871859.
3. Izmaylov A.Y. Smart technologies and robotic means in agricultural production // *Vestnik Rossiyskoy Akademii Nauk, Herald of the Russian Academy of Sciences*. – 2019. – Vol. 89 (5). – P. 536-538. – DOI: 10.31857/S0869-5873895536-538.
4. Stepanov A., Fomina E., Illarionova L., Dubrovin K., Fedoseev D. Vegetation Indices (NDVI and EVI) Time Series Approximation for Monitoring Crops of Khabarovsk Territory // *Informatics and Automation*. – 2023. – Vol. 22 (6). – P. 1473-1498. – DOI: 10.15622/ia.22.6.8.
5. Gubanov B., Lebedeva V., Lebedev I., Astapova M. Algorithms and software for evaluation of plant height in vertical farm using UAVs // *Agriculture Digitalization and Organic Production: Proceedings of the Second International Conference*. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. – P. 351-362.
6. Шаптыра С.В. Мониторинг сельскохозяйственных земель при помощи беспилотных летательных аппаратов // *Практические аспекты применения современных беспилотных летательных аппаратов: сборник научных трудов*. – 2022. – С. 46-57.
7. Nikolakopoulos I.A., Petropoulos G.P. Obtaining a Land Use/Cover Cartography in a Typical Mediterranean Agricultural Field Combining Unmanned Aerial Vehicle Data with Supervised Classifiers // *Land*. – 2025. – Vol. 14, No. 3. – P. 643.
8. Pavlova A.I. Application of unmanned and geoinformation technologies for digital soil mapping // *Information technologies, systems and devices in agroindustrial complex. – Agroinfo-2021*. – 2021. – P. 97-99.
9. Hassler S.C., Baysal-Gurel F. Unmanned aircraft system (UAS) technology and applications in agriculture // *Agronomy*. – 2019. – Vol. 9, No. 10. – P. 618.
10. Velusamy P., Rajendran S., Mahendran R. K., Naseer S., Shafiq M., Choi J.G. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in precision agriculture: Applications and challenges // *Energies*. – 2021. – Vol. 15, No. 1. – P. 217.
11. Makam S., Komatineni B.K., Meena S.S., Meena U. Unmanned aerial vehicles (UAVs): an adoptable technology for precise and smart farming // *Discover Internet of Things*. – 2024. – Vol. 4, No. 1. – P. 12.
12. Sharon G., Stern R., Felner A., Sturtevant N.R. Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding // *Artificial intelligence*. – 2015. – Vol. 219. – P. 40-66.
13. Wang Z., Zhang Z., Dou W., Hu G., Zhang L., Zhang M. Extending Conflict-Based Search for Optimal and Efficient Quadrotor Swarm Motion Planning // *Drones*. – 2024. – Vol. 8, No. 12. – P. 719.
14. Andreychuk A., Yakovlev K., Boyarski E., Stern R. Improving continuous-time conflict based search // *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. – 2021. – Vol. 35, No. 13. – P. 11220-11227.
15. Liu X., Su Y., Wu Y., Guo Y. Multi-conflict-based optimal algorithm for multi-UAV cooperative path planning // *Drones*. – 2023. – Vol. 7, No. 3. – P. 217.
16. Čáp M., Novák P., Vokřínek J., Pěchouček M. Multi-agent RRT*: Sampling-based cooperative pathfinding // *arXiv preprint arXiv:1302.2828*. – 2013.
17. Karaman S., Frazzoli E. Sampling based algorithms for optimal motion planning // *The international journal of robotics research*. – 2011. – Vol. 30, No 7. – P. 846-894.
18. Silver D. Cooperative pathfinding // *Proceedings of the aaai conference on artificial intelligence and interactive digital entertainment*. – 2005. – Vol. 1, No. 1. – P. 117-122.
19. Barer M. Sharon G., Stern R., Felner A. Suboptimal variants of the conflict based search algorithm for the multi agent pathfinding problem // *Proceedings of the international symposium on combinatorial Search*. – 2014. – Vol. 5, No. 1. – P. 19-27.
20. Van Den Berg J., Guy S. J., Lin M., Manocha D. Reciprocal n body collision avoidance // *Robotics Research: The 14th International Symposium ISRR*. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. – P. 3-19.
21. Van den Berg J., Lin M., Manocha D. Reciprocal velocity obstacles for real time multi agent navigation // *2008 IEEE international conference on robotics and automation*. – IEEE, 2008. – P. 1928-1935.
22. Yan X., Jiang D., Miao R., Li Y. Formation control and obstacle avoidance algorithm of a multi USV system based on virtual structure and artificial potential field // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 9, No. 2. – P. 161.
23. Wu W., Zhang X., Miao Y. Starling behavior inspired flocking control of fixed wing unmanned aerial vehicle swarm in complex environments with dynamic obstacles // *Biomimetics*. – 2022. – Vol. 7, No. 4. – P. 214.

24. Alqudsi Y. Synchronous task allocation and trajectory optimization for autonomous drone swarm // 2024 1st International Conference on Emerging Technologies for Dependable Internet of Things (ICETI). – IEEE, 2024. – P. 1-8.
25. Kotov D.V., Lebedev O.B. Control of movement of a group of UAVs with observance of the geometric structure of the formation based on alternative collective adaptation // Bulletin of SFedU. Technical sciences. – 2024. – Vol. 1. – P. 155-167.
26. Саенко И.Б., Лаута О.С., Мутяков Е.С., Соколов А.П. Алгоритм роевого управления БПЛА с элементами кластерного анализа // Информация и космос. – 2024. – № 4. – С. 68-75.
27. Irianto, Kurniawan. Performance Evaluation of LoRa in Farm Irrigation System with Internet of Things. Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control. – 2022. – DOI: 10.22219/kinetik.v7i4.1551.
28. Lim R.Y.H., et al. UAV swarm communication reliability based on a comprehensive SINR model // Vehicular Communications. – 2024. – Vol. 47. – P. 100781.

REFERENCES

1. Starovoytov V.I., Starovoytova O.A., Manokhina A.A., Shabanov N.E., Chayka V.A. Primenenie mikroelementov pri vyrashchivaniy kartofelya - predposylki ispol'zovaniya dronov [Application of trace elements in potato cultivation – prerequisites for the use of drones], *Agroinzheneriya* [Agricultural Engineering], 2021, Vol. 4, pp. 14-20. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-4-14-20.
2. Sun C., Zhou J., Ma Y., Xu Y., Pan B., Zhang Z. A review of remote sensing for potato traits characterization in precision agriculture, *Frontiers in Plant Science*, 2022, Vol. 13, pp. 871859. DOI: 10.3389/fpls.2022.871859.
3. Izmaylov A.Y. Smart technologies and robotic means in agricultural production, *Vestnik Rossiyskoy Akademii Nauk, Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2019, Vol. 89 (5), pp. 536-538. DOI: 10.31857/S0869-5873895536-538.
4. Stepanov A., Fomina E., Illarionova L., Dubrovin K., Fedoseev D. Vegetation Indices (NDVI and EVI) Time Series Approximation for Monitoring Crops of Khabarovsk Territory, *Informatics and Automation*, 2023, Vol. 22 (6), pp. 1473-1498. DOI: 10.15622/ia.22.6.8.
5. Gubanov B., Lebedeva V., Lebedev I., Astapova M. Algorithms and software for evaluation of plant height in vertical farm using UAVs, *Agriculture Digitalization and Organic Production: Proceedings of the Second International Conference*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, pp. 351-362.
6. Shaytura S.V. Monitoring sel'skokhozyaystvennykh zemel' pri pomoshchi bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Monitoring agricultural lands using unmanned aerial vehicles], *Prakticheskie aspekty primeneniya sovremennykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov: sbornik nauchnykh trudov* [Practical aspects of the use of modern unmanned aerial vehicles], 2022, pp. 46-57.
7. Nikolakopoulos I.A., Petropoulos G.P. Obtaining a Land Use/Cover Cartography in a Typical Mediterranean Agricultural Field Combining Unmanned Aerial Vehicle Data with Supervised Classifiers, *Land*, 2025, Vol. 14, No. 3, pp. 643.
8. Pavlova A.I. Application of unmanned and geoinformation technologies for digital soil mapping, *Information technologies, systems and devices in agroindustrial complex. Agroinfo-2021*, 2021, pp. 97-99.
9. Hassler S.C., Baysal-Gurel F. Unmanned aircraft system (UAS) technology and applications in agriculture, *Agronomy*, 2019, Vol. 9, No. 10, pp. 618.
10. Velusamy P., Rajendran S., Mahendran R. K., Naseer S., Shafiq M., Choi J.G. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in precision agriculture: Applications and challenges, *Energies*, 2021, Vol. 15, No. 1, pp. 217.
11. Makam S., Komatineni B.K., Meena S.S., Meena U. Unmanned aerial vehicles (UAVs): an adoptable technology for precise and smart farming, *Discover Internet of Things*, 2024, Vol. 4, No. 1, pp. 12.
12. Sharon G., Stern R., Felner A., Sturtevant N.R. Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding, *Artificial Intelligence*, 2015, Vol. 219, pp. 40-66.
13. Wang Z., Zhang Z., Dou W., Hu G., Zhang L., Zhang M. Extending Conflict-Based Search for Optimal and Efficient Quadrotor Swarm Motion Planning, *Drones*, 2024, Vol. 8, No. 12, pp. 719.
14. Andreychuk A., Yakovlev K., Boyarski E., Stern R. Improving continuous-time conflict based search, *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2021, Vol. 35, No. 13, pp. 11220-11227.
15. Liu X., Su Y., Wu Y., Guo Y. Multi-conflict-based optimal algorithm for multi-UAV cooperative path planning, *Drones*, 2023, Vol. 7, No. 3, pp. 217.
16. Čáp M., Novák P., Vokřínek J., Pěchouček M. Multi-agent RRT*: Sampling-based cooperative pathfinding, *arXiv preprint arXiv:1302.2828*, 2013.
17. Karaman S., Frazzoli E. Sampling based algorithms for optimal motion planning, *The international journal of robotics research*, 2011, Vol. 30, No 7, pp. 846-894.

18. Silver D. Cooperative pathfinding, *Proceedings of the aaai conference on artificial intelligence and interactive digital entertainment*, 2005, Vol. 1, No. 1, pp. 117-122.
19. Barer M., Sharon G., Stern R., Felner A. Suboptimal variants of the conflict based search algorithm for the multi agent pathfinding problem, *Proceedings of the international symposium on combinatorial Search*, 2014, Vol. 5, No. 1, pp. 19-27.
20. Van Den Berg J., Guy S. J., Lin M., Manocha D. Reciprocal n body collision avoidance, *Robotics Research: The 14th International Symposium ISRR*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 3-19.
21. Van den Berg J., Lin M., Manocha D. Reciprocal velocity obstacles for real time multi agent navigation, *2008 IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE, 2008, pp. 1928-1935.
22. Yan X., Jiang D., Miao R., Li Y. Formation control and obstacle avoidance algorithm of a multi USV system based on virtual structure and artificial potential field, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, Vol. 9, No. 2, pp. 161.
23. Wu W., Zhang X., Miao Y. Starling behavior inspired flocking control of fixed wing unmanned aerial vehicle swarm in complex environments with dynamic obstacles, *Biomimetics*, 2022, Vol. 7, No. 4, pp. 214.
24. Alqudsi Y. Synchronous task allocation and trajectory optimization for autonomous drone swarm, *2024 1st International Conference on Emerging Technologies for Dependable Internet of Things (ICETI)*. IEEE, 2024, pp. 1-8.
25. Kotov D.V., Lebedev O.B. Control of movement of a group of UAVs with observance of the geometric structure of the formation based on alternative collective adaptation, *Bulletin of SFedU. Technical sciences*, 2024, Vol. 1, pp. 155-167.
26. Saenko I.B., Lauta O.S., Mityakov E.S., Sokolov A.P. Algoritm roevogo upravleniya BPLA s elementami klasternogo analiza [Algorithm for swarm control of UAVs with elements of cluster analysis], *Informatsiya i kosmos [Information and Space]*, 2024, No. 4, pp. 68-75.
27. Irianto, Kurniawan. Performance Evaluation of LoRa in Farm Irrigation System with Internet of Things. *Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control*, 2022. DOI: 10.22219/kinetik.v7i4.1551.
28. Lim R.Y.H., et al. UAV swarm communication reliability based on a comprehensive SINR model, *Vehicular Communications*, 2024, Vol. 47, pp. 100781.

Савельев Антон Игоревич – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; e-mail: saveliev@iias.spb.su; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79522496544; старший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем.

Рябинов Артем Валерьевич – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; e-mail: ryabinov.a@iias.spb.su; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79969637353; младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем.

Семенов Александр Валерьевич – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; e-mail: semenov.a@iias.spb.su; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79500016901; младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем.

Saveliev Anton Igorevich – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: saveliev@iias.spb.su; St. Petersburg, Russia; phone: +79522496544; senior researcher, Laboratory of autonomous robotic systems.

Ryabinov Artem Valerievich – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: ryabinov.a@iias.spb.su; St. Petersburg, Russia; phone: +79969637353; junior researcher, Laboratory of autonomous robotic systems.

Semenov Alexander Valerievich – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: semenov.a@iias.spb.su; St. Petersburg, Russia; phone: +79500016901; junior researcher, Laboratory of autonomous robotic systems.

А.А. Шмидт, В.Р. Бикбулатов, Д.Н. Поляков, А.А. Тхакахов

**ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ НАЗЕМНО-ВОЗДУШНЫХ
РАДИОЛИНИЙ МЕТОДОМ АДАПТИВНОГО ИЗМЕНЕНИЯ МАРШРУТА
БПЛА-РЕТРАНСЛЯТОРА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКИ**

Актуальность работы обусловлена возрастающей интенсивностью радиоэлектронного противодействия в тактическом звене управления, при котором традиционные методы организации связи через ретрансляторы с фиксированными маршрутами не обеспечивают требуемую помехоустойчивость и разведзащищённость. Цель работы – разработка метода адаптивного управления маршрутом БПЛА-ретранслятора на основе непрерывного анализа электромагнитной обстановки для повышения помехоустойчивости наземно-воздушных радиолиний. В качестве основного метода использована многокритериальная оптимизация траектории полёта с адаптивными весовыми коэффициентами, одновременно учитывающая три критерия: минимизацию уровня помех на рабочих частотах ретранслятора, обеспечение радиодоступности с корреспондентами сети и снижение вероятности обнаружения средствами радиоэлектронной борьбы противника. Для восстановления пространственной картины помеховой обстановки по ограниченному набору бортовых измерений исследованы методы интерполяции и экстраполяции: метод обратных взвешенных расстояний, метод радиальных базисных функций и статистическая экстраполяция на основе пространственной корреляционной функции. Разработана циклическая процедура функционирования системы адаптивной маршрутизации, включающая сбор данных, построение трёхмерной карты помеховой обстановки, прогнозирование её развития, расчёт оптимальной траектории и контроль результата манёвра. Результаты имитационного моделирования показывают, что применение предложенного метода позволяет повысить отношение сигнал/помеха на 1,5–2 дБ в среднем и до 8 дБ при наихудшем сценарии по сравнению с полётом по фиксированному маршруту. Практическая значимость работы состоит в возможности реализации предложенного способа на базе существующих БПЛА и радиоэлектронного оборудования без принципиально новых технических решений.

БПЛА-ретранслятор; адаптивное изменение маршрута; помехоустойчивость; радиоэлектронная борьба; многокритериальная оптимизация; электромагнитная обстановка; интерполяция помех.

A.A. Shmidt, V.R. Bikbulatov, D.N. Polyakov, A.A. Thakahov

**IMPROVING INTERFERENCE IMMUNITY OF GROUND-TO-AIR RADIO LINKS
BY ADAPTIVE ROUTE MODIFICATION OF A UAV RELAY BASED
ON INTERFERENCE ENVIRONMENT ANALYSIS**

The relevance of the work is driven by the increasing intensity of electronic countermeasures in the tactical command echelon, where traditional relay communication methods with fixed routes fail to ensure the required interference immunity and signal security. The objective of this study is to develop a method for adaptive route control of a UAV relay based on continuous monitoring of the electromagnetic environment in order to improve interference immunity of ground-to-air radio links. The primary method employed is multi-criteria flight path optimization with adaptive weighting coefficients, simultaneously considering three criteria: minimization of interference levels at the relay operating frequencies, ensuring radio accessibility with network correspondents, and reduction of detection probability by enemy electronic warfare assets. To reconstruct the spatial interference pattern from a limited set of onboard measurements, several interpolation and extrapolation methods are examined: inverse distance weighting, radial basis function interpolation, and statistical extrapolation based on a spatial correlation function. A cyclic operational procedure for the adaptive routing system is developed, comprising data collection, construction of a three-dimensional interference map, prediction of its evolution, calculation of the optimal trajectory, and monitoring of the maneuver outcome. Simulation results show that the proposed method increases the signal-to-interference ratio by 1.5–2 dB on average and up to 8 dB in the worst-case scenario compared to fixed-route flight. The practical significance lies in the possibility of implementing the proposed method using existing UAV platforms and radio-electronic equipment without fundamentally new technical solutions.

UAV relay; adaptive routing; interference immunity; electronic warfare; multi-criteria optimization; electromagnetic environment; interference interpolation.

Введение. Современные условия применения средств радиосвязи специального назначения характеризуются сложной и динамически изменяющейся электромагнитной обстановкой. Традиционные методы организации связи через стационарные ретрансляторы или ретрансляторы на БПЛА с фиксированными маршрутами не позволяют соблюдать требования по помехоустойчивости и разведзащищенности [1].

Вопросы применения БПЛА в системах беспроводной связи получили широкое отражение в научной литературе [2–5]. Показано, что оптимизация траектории полёта БПЛА позволяет существенно улучшить характеристики канала связи [6, 7]. Вместе с тем задача адаптивного управления маршрутом в условиях активного радиоэлектронного противодействия со стороны противника в перечисленных работах не рассматривалась, что определяет научную новизну настоящего исследования.

Применение БПЛА в качестве воздушных ретрансляторов позволяет динамически адаптироваться к помеховой обстановке за счёт изменения пространственного положения приёмопередатчика. Однако для реализации этой возможности необходимы специальные алгоритмы управления траекторией полёта, учитывающие текущую электромагнитную обстановку.

Научно-техническое предложение, изложенное в статье, заключается в оснащении БПЛА-ретранслятора бортовым анализатором спектра и системой адаптивного управления маршрутом, которая в реальном времени оптимизирует траекторию полёта для улучшения помехоустойчивости сети радиосвязи.

Таким образом, научная задача, решаемая в настоящей работе, заключается в разработке метода адаптивного управления маршрутом БПЛА-ретранслятора, обеспечивающего повышение помехоустойчивости наземно-воздушных радиолиний в условиях динамически изменяющейся помеховой обстановки при активном радиоэлектронном противодействии. Для решения указанной задачи необходимо:

- ♦ формализовать критерии оптимальности траектории полёта БПЛА-ретранслятора, учитывающие минимизацию уровня помех на рабочих частотах, обеспечение радиодоступности с корреспондентами сети и снижение вероятности обнаружения средствами РЭБ противника;
- ♦ разработать алгоритм многокритериальной оптимизации маршрута с адаптивной настройкой весовых коэффициентов в зависимости от текущей электромагнитной обстановки;
- ♦ исследовать методы восстановления пространственного распределения помех по ограниченному набору бортовых измерений для построения трёхмерных карт помеховой обстановки;
- ♦ оценить эффективность предложенного метода средствами имитационного моделирования при различных сценариях применения средств РЭБ.

Методика исследования. Задача повышения помехоустойчивости наземно-воздушных радиолиний с применением БПЛА-ретранслятора может решаться различными подходами.

Первый подход – применение методов адаптивной обработки сигналов непосредственно на борту ретранслятора (пространственно-временная адаптация, подавление помех в антенном тракте) [8].

Второй подход – использование помехозащищённых видов сигналов: широкополосных систем с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) или прямым расширением спектра [9].

Третий подход – управление пространственным положением ретранслятора, то есть адаптивное изменение маршрута БПЛА с целью нахождения в зонах с благоприятной электромагнитной обстановкой [10, 11].

Первые два подхода обеспечивают помехозащиту на уровне физического и канального уровней и хорошо изучены, однако требуют значительного усложнения аппаратуры и не устраняют проблему фиксированного маршрута, при котором БПЛА может оказаться в зоне интенсивного воздействия РЭБ. Третий подход, напротив, позволяет использовать саму мобильность БПЛА как механизм адаптации к помеховой обстановке, не требуя принципиаль-

ного изменения радиоаппаратуры, и поэтому выбран в качестве основного в настоящей работе. Указанные подходы не являются взаимоисключающими и могут применяться совместно, однако именно пространственная адаптация маршрута представляет наибольший практический интерес в условиях динамически изменяющейся обстановки РЭБ.

В качестве стратегии исследования выбран аналитико-модельный подход, сочетающий разработку математической модели системы адаптивной маршрутизации с последующей верификацией посредством имитационного моделирования. Такая стратегия обусловлена невозможностью проведения натурного эксперимента в условиях реальной помеховой обстановки, а также необходимостью оценки эффективности предложенной методологии при различных сценариях применения средств РЭБ. Аналитическое моделирование позволяет формализовать задачу оптимизации и получить достаточно точные математические соотношения, тогда как имитационное моделирование даёт возможность проверить работоспособность алгоритма в условиях, приближённых к реальным, включая стохастический характер помеховой обстановки и ограничения на манёвренность БпЛА.

Суть научно-технического предложения состоит в непрерывном мониторинге электромагнитной обстановки в процессе полета БпЛА и автоматической корректировке маршрута на основе получаемых данных. При этом система одновременно решает три взаимосвязанные задачи:

- ♦ минимизация воздействия шумов и помех – БпЛА стремится находиться в областях пространства с минимальным уровнем шумов и помех на рабочих частотах;
- ♦ нахождение в зоне радиодоступности с корреспондентами радиосети;
- ♦ снижение вероятности обнаружения – выбор траектории, минимизирующей электромагнитную доступность для средств РЭБ.

Система адаптивной маршрутизации включает следующие основные компоненты:

- ♦ бортовой анализатор спектра;
- ♦ модуль построения карт помеховой обстановки;
- ♦ вычислительный модуль оптимизации траектории;
- ♦ модуль управления полетом.

При выборе оптимального маршрута система решает задачу многокритериальной оптимизации. Обозначим положение БпЛА в момент времени t как вектор:

$$\vec{r}(t) = [x(t), y(t), z(t)], \quad (1)$$

где x, y – горизонтальные координаты, z – высота полета [12].

Тогда задачу оптимизации можно сформулировать следующим образом:

$$\vec{r}_{\text{опт}}(t) = \arg \min \{ w_1 B_1(\vec{r}) + w_2 B_2(\vec{r}) + w_3 B_3(\vec{r}) \}, \quad (2)$$

где B_1, B_2, B_3 – критерии оптимизации, w_1, w_2, w_3 – весовые коэффициенты, определяющие приоритеты при $\sum w_i = 1$.

Весовые коэффициенты адаптивно изменяются в зависимости от текущей обстановки. Базовые веса задает оператор перед полетом, исходя из тактической обстановки. Коэффициенты приоритета автоматически корректируют эти веса в реальном времени. Если уровень помех растет относительно нормы, коэффициент приоритета увеличивается, повышая важность критерия минимизации помех.

Перейдем к более подробному рассмотрению критериев оптимизации.

$$B_1(\vec{r}) = P_{\text{ш}} + \sum_{k=1}^N P_k \left(\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_k|} \right)^n F_k(\theta_k, \varphi_k), \quad (3)$$

где $P_{\text{ш}}$ – мощность теплового шума приемника, P_k – мощность k -го источника помех, n – эмпирический показатель затухания ($n=2$ для свободного пространства, 2,5-4 для городской застройки), F_k – нормированная характеристика направленности k -го источника помех в направлении на ретранслятор на БпЛА.

С учетом полета БпЛА критерий интегрируется по времени:

$$B_{\text{интегр1}} = \int_0^T B_1(\vec{r}(t)) dt. \quad (4)$$

Корреспонденты считаются находящимися в зоне радиодоступности при условии обеспечения минимального необходимого для обеспечения требуемой вероятности связи мощности сигнала на входе приемника:

$$B_2(\vec{r}) = \max_{j \in \{1,2\}} \left(\frac{P_c}{P_{ш} + P_{пом}}(\vec{r}) \right). \quad (5)$$

Вероятность обнаружения БПЛА средствами РЭБ противника выражается через интеграл:

$$B_3(\vec{r}) = \int_{S_{РЭБ}} P_{обн}(\vec{r}, \vec{s}) \cdot \rho_{РЭБ}(\vec{s}) dS, \quad (6)$$

где $S_{РЭБ}$ – область вероятного размещения средств РЭБ, $\rho_{РЭБ}(\vec{s})$ – плотность вероятности нахождения средств РЭБ в точке $\vec{s}$, $P_{обн}$ – вероятность обнаружения, определяемая как:

$$P_{обн}(\vec{r}, \vec{s}) = \begin{cases} 0, & P_{вх}^{РЭБ} < P_{пор} - M_{зап} \frac{P_{вх}^{РЭБ} - (P_{пор} - M_{зап})}{2M_{зап}}, & P_{пор} - M_{зап} \leq P_{вх}^{РЭБ} < P_{пор} + M_{зап}, \\ 1, & P_{вх}^{РЭБ} < P_{пор} + M_{зап} \end{cases}, \quad (7)$$

где мощность сигнала на входе приемника РЭБ:

$$P_{вх}^{РЭБ} = P_{ретр} + G_{ретр}(\theta, \varphi) - L_{своб}(|\vec{r} - \vec{s}|) + G_{РЭБ}, \quad (8)$$

где $P_{пор}$ – порог чувствительности средств РЭБ, $M_{зап}$ – переходная зона – это диапазон мощностей сигнала, в котором вероятность обнаружения плавно изменяется 0 до 1. Переходная зона обусловлена: наличием флуктуаций сигнала, возникающих вследствие замираний, эффектов многолучевости, а также в меньшей степени атмосферных изменений, при которых принимаемая мощность постоянно колеблется относительно среднего значения; тепловыми и внутренними шумами приемника (имеется в виду приемник средства или комплекса РЭБ); порогом принятия решения, при котором оператор или автоматика должны принять решение об обнаружении на основе зашумленных сигналов [13].

Блок-схема алгоритма адаптивного изменения маршрута изображена на рис. 1.

Работа системы адаптивной маршрутизации организована в виде циклического процесса, включающего следующие этапы:

Этап 1. Сбор данных о помеховой обстановке. Выполняется сканирование спектра в текущей точке маршрута, измеряя уровни сигналов и помех в диапазоне рабочих частот ретранслятора. Полученные данные привязываются к координатам и времени измерения;

Этап 2. Построение пространственной модели помеховой обстановки. На основе накопленных измерений строится трехмерная карта распределения помех в районе полета. Для областей, где прямые измерения отсутствуют, выполняется интерполяция с учетом физических закономерностей распространения радиоволн [14, 15];

Этап 3. Прогнозирование развития обстановки. Система анализирует динамику изменения помеховой обстановки и прогнозирует ее развитие на период планирования. Это позволяет учитывать мобильные источники помех и изменение условий распространения радиоволн;

Этап 4. Расчет оптимальной траектории. С учетом всех критериев и ограничений рассчитывается траектория полета на следующий период. При этом используется многокритериальная оптимизация с адаптивными весовыми коэффициентами, которые изменяются в зависимости от текущей обстановки;

Этап 5. Выполнение маневра и контроль результата. БПЛА выполняет рассчитанный маневр, при этом система непрерывно контролирует фактические показатели качества связи. При существенном расхождении с прогнозом выполняется внеочередной перерасчет траектории.

Ключевой проблемой при реализации адаптивной маршрутизации БПЛА является невозможность одновременного измерения уровня помех во всех точках пространства. БПЛА может проводить измерения только в тех точках, через которые проходит его траектория. Поэтому необходимы методы восстановления полной картины помеховой обстановки по ограниченному набору измерений. Рассмотрим некоторые методы, применимые к решению данной задачи.

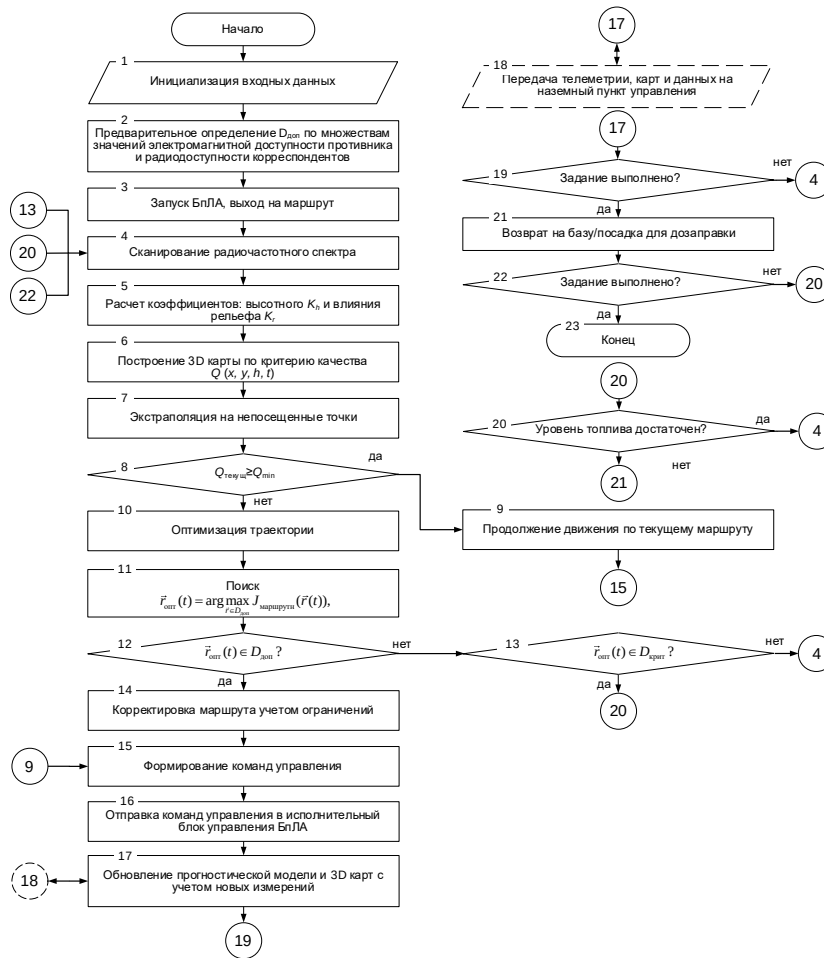


Рис. 1. Блок-схема алгоритма адаптивного изменения маршрута

Метод взвешенной интерполяции (а именно метод обратных взвешенных расстояний) – это метод пространственной интерполяции, который использует значения известных точек для оценки значений в неизвестных. Метод предполагает, что каждая измеренная точка оказывает локальное влияние, которое уменьшается с расстоянием. Вес точки пропорционален обратным расстояниям между точкой данных и интерполируемым местоположением, возведённым в степень p [16].

Для восстановления уровня помех в произвольной точке пространства $\vec{r}$ по измерениям в точках $\vec{r}_k$ при $k \in [1; N]$ метод обратных взвешенных расстояний интерпретируется как:

$$P_{\text{пом}}(\vec{r}) = \frac{\sum_{k=1}^N w_k(\vec{r}) \cdot P_{\text{изм}}(\vec{r}_k)}{\sum_{k=1}^N w_k(\vec{r})}, \quad (9)$$

где весовые коэффициенты определяются как:

$$w_k(\vec{r}) = \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_k|^p + \varepsilon}. \quad (10)$$

Здесь p – параметр степени, характеризующий скорость уменьшения весов. При задании большого значения степени влияние ближних точек будет более значительным. Задание меньшего значения степени увеличит влияние дальних точек, и поверхность получится более гладкой. Обычно используется значение степени 2, что соответствует закону обратных квадратов,

ε – бесконечно малый (ненулевой) параметр для исключения деления на ноль, $|\vec{r} - \vec{r}_k|$ – евклидово расстояние между точками.

Также для решения задачи интерполяции пригоден метод радиальных базисных функций (РБФ) [17]. Это метод в теории аппроксимации для построения интерполяций высокого порядка точности неструктурированных данных в пространствах большой размерности. Интерполянт принимает форму взвешенной суммы радиальных базисных функций. В контексте решения задачи уровень помех представляется в виде:

$$P_{\text{пом}}(\vec{r}) = \sum_{k=1}^N \alpha_k \cdot \phi(|\vec{r} - \vec{r}_k|) + p_0, \quad (11)$$

где $\phi(|\vec{r} - \vec{r}_k|)$ – РБФ.

В качестве РБФ выбирается Гауссова функция:

$$\phi(|\vec{r} - \vec{r}_k|) = \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right). \quad (12)$$

Параметр σ определяет «радиус влияния» каждого измерения и выбирается как:

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \min_{j \neq k} |\vec{r}_k - \vec{r}_j|, \quad (13)$$

т.е. как среднее расстояние между точками измерений.

Коэффициенты α_k находятся при решении системы уравнений:

$$\begin{bmatrix} 1 & \phi_{r12} & \phi_{r13} & \dots & \phi_{r1N} & 1 \\ \phi_{r21} & 1 & \phi_{r23} & \dots & \phi_{r2N} & 1 \\ \phi_{r31} & \phi_{r32} & 1 & \dots & \phi_{r3N} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \phi_{rN1} & \phi_{rN2} & \phi_{rN3} & \dots & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \dots \\ \alpha_N \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\text{изм}}(\vec{r}_1) \\ P_{\text{изм}}(\vec{r}_2) \\ P_{\text{изм}}(\vec{r}_3) \\ \dots \\ P_{\text{изм}}(\vec{r}_N) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где $P_{\text{изм}}(\vec{r}_i)$ – мощность помех, измеренная в i -й точке.

При наличии препятствия между источником помех и точкой наблюдения вводится коэффициент дифракционных потерь:

$$L_{\text{дифр}} = 6,9 + 20 \lg \left(\sqrt{\left(h_{\text{преп}} \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2}} - 0,1 \right)^2} + 1 + h_{\text{преп}} \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2}} - 0,1 \right), \quad (15)$$

где $h_{\text{преп}}$ – превышение препятствия над линией прямой видимости, d_1, d_2 – расстояния от источника сигнала и его приемника до препятствия соответственно, λ – длина волны.

Для областей, существенно удаленных от точек измерения возможно применение статистической экстраполяции на основе пространственной корреляционной функции. Этот метод экстраполяции широко распространен в метеорологии, где решение задачи сводится к тому, чтобы в текущий момент времени по совокупности данных от разнесенных измерительных станций сформировать оценку метеорологической величины в произвольной точке заданного пространства (или узле регулярной сетки) с определенными координатами там, где измерения отсутствуют или невозможны [18].

Для задачи анализа помеховой обстановки применим аналогичный подход. Уровень помех в соседних точках пространства обычно коррелирован, поскольку:

♦ источники помех имеют конечную мощность и создают поле определенной структуры;

♦ условия распространения радиоволн плавно меняются в пространстве;

♦ рельеф местности создает зоны затенения и переотражения.

В контексте решения задачи пространственной аппроксимации помеховой обстановки корреляционная функция выглядит следующим образом:

$$C(r) = \sigma_{\text{пом}}^2 \exp\left(-\frac{r}{L_{\text{корр}}}\right) \cos\left(\frac{\pi r}{\Lambda}\right), \quad (16)$$

где $\sigma_{\text{пом}}^2$ – дисперсия уровня помех, $L_{\text{корр}}$ – масштаб пространственной корреляции (определяется эмпирическим способом). Для городской местности порядка 3-5 км, для открытой 10-12 км, Λ – период пространственных осцилляций, вызванных интерференцией сигналов от разных источников (определяется эмпирическим способом, порядка 10-20 км) [19].

Результаты. В ходе имитационного моделирования разработанного алгоритма адаптивной маршрутизации БпЛА-ретранслятора оценивалось изменение отношения сигнал/помеха (ОСП) на входе приёмника наземного абонента по сравнению с базовым вариантом полёта по фиксированному маршруту. Моделирование проводилось для района с протяжённостью 20×20 км при высоте полёта БпЛА 500–1500 м, диапазоне рабочих частот ретранслятора 220–520 МГц и трёх характерных сценариях помеховой обстановки. Вариант маршрутной карты и адаптивного изменения маршрута изображены на рис. 2.

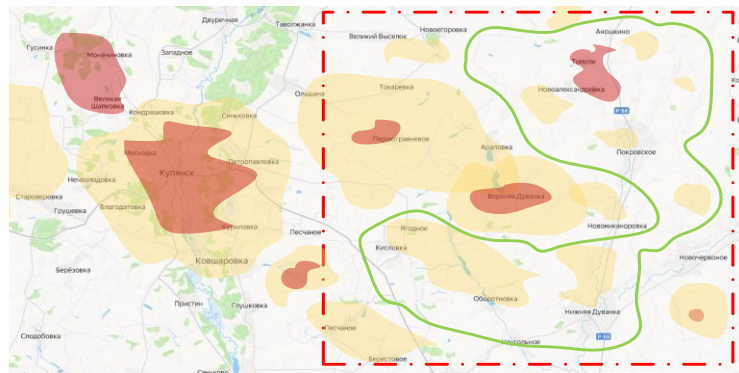


Рис. 2. Маршрутная карта БпЛА и вариант адаптивного изменения его маршрута на основе анализа электромагнитной обстановки

Сценарий 1 предполагает наличие нескольких стационарных источников помех, равномерно распределённых по площади района полёта с суммарной мощностью, снижающей ОСП до порогового уровня на 30% площади. В данном сценарии алгоритм адаптивного изменения маршрута обеспечивает прирост среднего ОСП на 1,5–2 дБ по сравнению с фиксированным маршрутом. Это согласуется с результатами работы [12], в которой для аналогичных условий с применением алгоритмов оптимизации траектории на основе обучения с подкреплением получен прирост ОСП порядка 1,8–2,2 дБ. Несколько меньшее среднее значение прироста в предложенном методе объясняется тем, что при равномерно рассредоточенной помеховой обстановке возможности пространственного манёвра для её избегания ограничены, и значительная часть выигрыша достигается за счёт оптимального выбора высоты полёта, а не горизонтального манёвра. Результат применения алгоритма изображен на рис. 3. На рис. 3-5 красная кривая – ОСП без применения алгоритма адаптивного изменения маршрута БпЛА, синяя кривая – ОСП с применением алгоритма адаптивного изменения маршрута БпЛА, желтая пунктирная черта – пороговый уровень ОСП для обеспечения стабильной работы радиолинии.

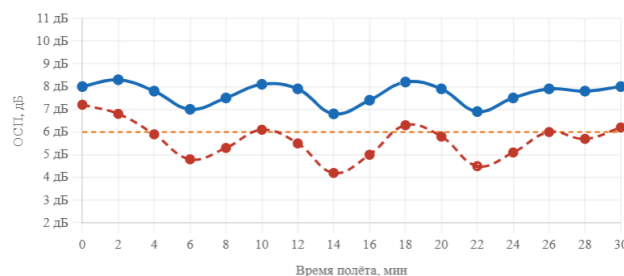


Рис. 3. Результат применения алгоритма для Сценария 1

Сценарий 2 предполагает воздействие одного мощного источника прицельной помехи, создающего зону подавления. В этом сценарии алгоритм обеспечивает прирост ОСП в диапазоне 3,5–5 дБ за счёт огибания зоны подавления по оптимальной траектории при сохранении радиодоступности с обоими наземными корреспондентами. Наиболее важным оказывается второй критерий оптимизации B_2 : без его учёта алгоритм стремился бы максимально удалить БПЛА от источника помехи, нарушая при этом условие радиодоступности. Взаимодействие критериев через механизм адаптивных весовых коэффициентов обеспечивает нахождение компромиссного решения, при котором ОСП повышается без потери связности сети. Результат применения алгоритма изображен на рис. 4.

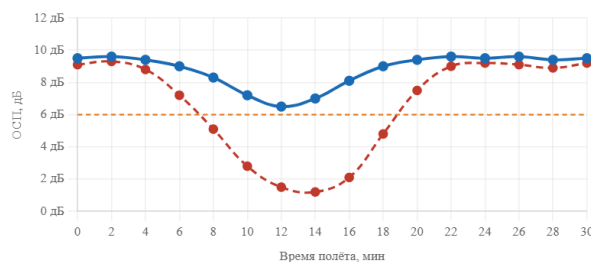


Рис. 4. Результат применения алгоритма для Сценария 2

Сценарий 3 является наихудшим сценарием и предполагает целенаправленное применение противником мобильных средств РЭБ с возможностью перехвата и пеленгации излучения ретранслятора. В данном сценарии прирост ОСП достигает 8 дБ по сравнению с фиксированным маршрутом. Столь значительный выигрыш обусловлен тем, что при полёте по фиксированному маршруту БПЛА периодически попадает в зону эффективного воздействия средств РЭБ, тогда как алгоритм адаптивной маршрутизации заблаговременно перестраивает траекторию на основе прогноза развития помеховой обстановки (этап 3 циклической процедуры). Дополнительный вклад вносит третий критерий оптимизации B_3 : снижение вероятности обнаружения БПЛА уменьшает эффективность пеленгации и, следовательно, точность постановки прицельных помех. Данный результат принципиально согласуется с выводами работы [1], в которой показано, что динамическое управление положением ретранслятора в условиях нестационарной помеховой обстановки позволяет значительно превысить эффективность статических решений, особенно при активном противодействии. Результат применения алгоритма изображен на рис. 5.

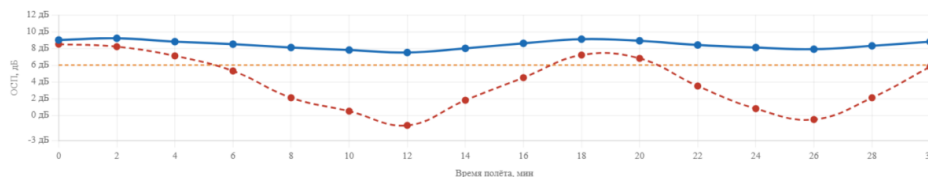


Рис. 5. Результат применения алгоритма для Сценария 3

Сравнение методов восстановления пространственной картины помеховой обстановки – метода обратных взвешенных расстояний (МОВР), метода радиальных базисных функций (РБФ) и корреляционной экстраполяции (КЭ) – проводилось по двум показателям: среднеквадратической погрешности восстановления уровня помех (в дБ) и вычислительной сложности (условные единицы времени на один цикл пересчёта карты). Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение методов восстановления пространственной картины помеховой обстановки

Метод	СКП восстановления, дБ	Вычислительная сложность	Область применения
МОВР	2,8–3,5	Низкая	Равномерно распределённые источники, ограниченные ресурсы бортовой ЭВМ
РБФ	1,2–1,8	Средняя	Сложная структура поля помех, достаточные ресурсы бортовой ЭВМ
КЭ	3,1–4,0	Низкая	Области вдали от траектории БпЛА, экстраполяция на необследованные зоны

Из табл. 1 следует, что наименьшую погрешность восстановления обеспечивает метод РБФ, что соответствует его теоретически обоснованным преимуществам при аппроксимации неструктурированных данных в многомерных пространствах [17]. Метод обратных взвешенных расстояний уступает РБФ по точности, однако существенно менее требователен к вычислительным ресурсам, что делает его предпочтительным для реализации на бортовых вычислительных средствах с ограниченной производительностью. Корреляционная экстраполяция показывает наибольшую погрешность в зонах, прилегающих к измеренным точкам, однако остаётся единственным применимым методом для областей, значительно удалённых от траектории БпЛА, где прямые измерения отсутствуют.

Следует отметить, что точность восстановления помеховой обстановки непосредственно влияет на эффективность оптимизации маршрута: замена метода МОВ на РБФ в рамках одного и того же алгоритма маршрутизации увеличивает прирост ОСП в сценарии 1 на дополнительные 0,3–0,5 дБ. Это подтверждает, что качество пространственной модели помеховой обстановки является существенным фактором общей эффективности системы, а не только вспомогательной задачей.

Заключение. Предложенный способ адаптивного изменения маршрута БпЛА-ретранслятора обеспечивает решение проблемы устойчивости радиосвязи в условиях сложной помеховой обстановки. Ключевым преимуществом является способность системы автономно оптимизировать траекторию полёта. Реализация способа не требует принципиально новых технических решений и может быть выполнена на базе существующих БпЛА и радиоэлектронного оборудования. Необходимые вычислительные мощности обеспечиваются современными бортовыми процессорами. Дальнейшее развитие способа связано с применением методов машинного обучения для прогнозирования развития помеховой обстановки [20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Aljehani M., Inoue M. Communication and autonomous control of multi-UAV system in disaster response tasks // Agent and Multi-Agent Systems: Technology and Applications: 11th KES International Conference, KES-AMSTA 2017, Vilamoura, Portugal, June 2017. – Cham: Springer International Publishing, 2018. – P. 123-132.
2. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Nam Y.-H., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Vol. 21, No. 3. – P. 2334-2360.
3. Zeng Y., Zhang R., Lim T.J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges // IEEE Communications Magazine. – 2016. – Vol. 54, No. 5. – P. 36-42.
4. Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2016. – Vol. 18, No. 2. – P. 1123-1152.

5. Hayat S., Yanmaz E., Muzaffar R. Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2016. – Vol. 18, No. 3. – P. 2624-2661.
6. Wu Q., Zeng Y., Zhang R. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2018. – Vol. 17, No. 4. – P. 2109-2121.
7. Zeng Y., Xu J., Zhang R. Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2019. – Vol. 18, No. 4. – P. 2329-2345.
8. Li B., Fei Z., Zhang Y. UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends // *IEEE Internet of Things Journal*. – 2019. – Vol. 6, No. 2. – P. 2241-2263.
9. Fotouhi A., Qiang H., Ding M., Hassan M., Giordano L.G., Garcia-Rodriguez A., Yuan J. Survey on UAV cellular communications: Practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2019. – Vol. 21, No. 4. – P. 3417-3442.
10. Cui M., Zhang G., Wu Q., Ng D.W.K. Robust trajectory and transmit power design for secure UAV communications // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2018. – Vol. 67, No. 9. – P. 9042-9046.
11. Zhang G., Wu Q., Cui M., Zhang R. Securing UAV communications via joint trajectory and power control // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2019. – Vol. 18, No. 2. – P. 1376-1389.
12. Abohashish S.M.M., Rizk R.Y., Elsedimy E.I. Trajectory optimization for UAV-assisted relay over 5G networks based on reinforcement learning framework // *Journal of Wireless Communications and Networking*. – 2023. – Vol. 2023, No. 55.
13. Мешалкин В.А., Сосунов Б.В. Основы энергетического расчёта радиоканалов. – Ленинград: ВАС, 1991. – 110 с.
14. Matolak D.W., Sun R. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems. – Part I: Methods, measurements, and models for over-water settings // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2017. – Vol. 66, No. 1. – P. 26-44.
15. Sun R., Matolak D.W. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems – Part II: Hilly and mountainous settings // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2017. – Vol. 66, No. 3. – P. 1913-1925.
16. Challita U., Ferdowsi A., Chen M., Saad W. Machine learning for wireless connectivity and security of cellular-connected UAVs // *IEEE Wireless Communications*. – 2019. – Vol. 26, No. 1. – P. 28-35.
17. Дударов С.П., Васильев М.В., Калайчев Г.В. Классификация данных нейронными сетями на основе радиально-базисных функций // *Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: Сб. научных статей I Всерос. науч. конф., 12–14 декабря 2017 г. – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2017. – С. 86-92.*
18. Комаров В.С., Лавриненко А.В., Ломакина Н.Я., Попов Ю.Б., Попова А.И., Ильин С.Н. Пространственная экстраполяция метеорологических полей в области мезомасштаба на основе четырёхмерной смешанной динамико-стохастической модели и аппарата калмановской фильтрации // *Оптика атмосферы и океана*. – 2004. – Т. 17, № 8. – С. 651-656.
19. Костин П.С., Вережагин Ю.О., Волошин В.А. Программно-моделирующий комплекс для полунатурного моделирования динамики манёвренного самолёта // *Тр. МАИ*. – 2015. – № 81.
20. Bithas P.S., Michailidis E.T., Nomikos N., Vouyioukas D., Kanatas A.G. A survey on machine-learning techniques for UAV-based communications // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19, No. 23. – Article 5170.

REFERENCES

1. Aljehani M., Inoue M. Communication and autonomous control of multi-UAV system in disaster response tasks, *Agent and Multi-Agent Systems: Technology and Applications: 11th KES International Conference, KES-AMSTA 2017, Vilamoura, Portugal, June 2017*. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 123-132.
2. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Nam Y.-H., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, Vol. 21, No. 3, pp. 2334-2360.
3. Zeng Y., Zhang R., Lim T.J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges, *IEEE Communications Magazine*, 2016, Vol. 54, No. 5, pp. 36-42.
4. Gupta L., Jain R., Vazskun G. Survey of important issues in UAV communication networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, Vol. 18, No. 2, pp. 1123-1152.
5. Hayat S., Yanmaz E., Muzaffar R. Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, Vol. 18, No. 3, pp. 2624-2661.
6. Wu Q., Zeng Y., Zhang R. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, Vol. 17, No. 4, pp. 2109-2121.

7. Zeng Y., Xu J., Zhang R. Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, Vol. 18, No. 4, pp. 2329-2345.
8. Li B., Fei Z., Zhang Y. UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends, *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, Vol. 6, No. 2, pp. 2241-2263.
9. Fotouhi A., Qiang H., Ding M., Hassan M., Giordano L.G., Garcia-Rodriguez A., Yuan J. Survey on UAV cellular communications: Practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, Vol. 21, No. 4, pp. 3417-3442.
10. Cui M., Zhang G., Wu Q., Ng D.W.K. Robust trajectory and transmit power design for secure UAV communications, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, Vol. 67, No. 9, pp. 9042-9046.
11. Zhang G., Wu Q., Cui M., Zhang R. Securing UAV communications via joint trajectory and power control, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, Vol. 18, No. 2, pp. 1376-1389.
12. Abomhashish S.M.M., Rizk R.Y., Elsedimy E.I. Trajectory optimization for UAV-assisted relay over 5G networks based on reinforcement learning framework, *Journal of Wireless Communications and Networking*, 2023, Vol. 2023, No. 55.
13. Meshalkin V.A., Sosunov B.V. Osnovy energeticheskogo rascheta radiokanalov [Fundamentals of energy calculation of radio channels]. Leningrad: VAS, 1991, 110 p.
14. Matolak D.W., Sun R. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems. – Part I: Methods, measurements, and models for over-water settings, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, Vol. 66, No. 1, pp. 26-44.
15. Sun R., Matolak D.W. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems – Part II: Hilly and mountainous settings, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, Vol. 66, No. 3, pp. 1913-1925.
16. Challita U., Ferdowsi A., Chen M., Saad W. Machine learning for wireless connectivity and security of cellular-connected UAVs, *IEEE Wireless Communications*, 2019, Vol. 26, No. 1, pp. 28-35.
17. Dudarov S.P., Vasil'ev M.V., Kalaychev G.V. Klassifikatsiya dannykh neyronnymi setyami na osnove radial'no-bazisnykh funktsiy [Data classification by neural networks based on radial basis functions], *Informatsionnye tekhnologii v modelirovani i upravlenii: podkhody, metody, resheniya: Sb. nauchnykh statey I Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii, 12–14 dekabrya 2017 g.* [Information technologies in modeling and control: approaches, methods, solutions: Collection of scientific articles of the I All-Russian scientific conference, December 12–14, 2017]. Tol'yatti: Tol'yattinskiy gosudarstvennyy universitet, 2017, pp. 86-92.
18. Komarov V.S., Lavrinenko A.V., Lomakina N.Ya., Popov Yu.B., Popova A.I., Il'in S.N. Prostranstvennaya ekstrapolyatsiya meteorologicheskikh poley v oblasti mezomasshtaba na osnove chetyrekhmernoy smeshannoy dinamiko-stokhasticheskoy modeli i apparata kalmanovskoy fil'tratsii [Spatial extrapolation of meteorological fields in the mesoscale region based on a four-dimensional mixed dynamic-stochastic model and the Kalman filtering apparatus], *Optika atmosfery i okeana* [Optics of the atmosphere and ocean], 2004, Vol. 17, No. 8, pp. 651-656.
19. Kostin P.S., Vereshchagin Yu.O., Voloshin V.A. Programmno-modeliruyushchiy kompleks dlya polunaturnogo modelirovaniya dinamiki manevrennogo samoleta [Software and modeling complex for semi-naturalistic modeling of the dynamics of a maneuverable aircraft], *Tr. MAI* [Proceedings of MAI], 2015, No. 81.
20. Bithas P.S., Michailidis E.T., Nomikos N., Vouyioukas D., Kanatas A.G. A survey on machine-learning techniques for UAV-based communications, *Sensors*, 2019, Vol. 19, No. 23, Article 5170.

Шмидт Артур Андреевич – Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Будённого Министерства обороны Российской Федерации; e-mail: shmidt.artur2011@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89500479274; адъюнкт.

Бикбулатов Владислав Родионович – Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Будённого Министерства обороны Российской Федерации; e-mail: vlad.bik@icloud.com; г. Санкт-Петербург Россия; тел.: 89953062642; адъюнкт.

Поляков Дмитрий Николаевич – Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого Министерства обороны Российской Федерации; e-mail: bryanik51@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89113045069; адъюнкт.

Тхакахов Алим Артурович – Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Будённого Министерства обороны Российской Федерации; e-mail: thakahov.98@bk.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89145105299; адъюнкт.

Shmidt Artur Andreevich – Military Order of Zhukov and Lenin Red Banner Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: shmidt.artur2011@yandex.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +79500479274; adjunct.

Bikbulatov Vladislav Rodionovich – Military Order of Zhukov and Lenin Red Banner Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: vlad.bik@icloud.com; St. Petersburg, Russia; phone: +79953062642; adjunct.

Polyakov Dmitry Nikolaevich – Military Order of Zhukov and Lenin Red Banner Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: bryanik51@mail.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +79113045069; adjunct.

Tkhakakhov Alim Arturovich – Military Order of Zhukov and Lenin Red Banner Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: thakahov.98@bk.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +79145105299; adjunct.

УДК 004.81: 004.75

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-71-81

К.Ч. Бжихатлов, И.А. Пшенокова

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ РЕПРЕЗЕНТАЦИИ СОСТОЯНИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ ДЛЯ АВТОНОМНОГО РОБОТА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания эффективных систем управления автономными роботами, способных функционировать в условиях неопределенности и динамически изменяющейся среды. Система репрезентации внешней среды должна решать задачи локализации, картографирования, обнаружения и классификации объектов, прогнозирования динамики и семантической интерпретации. Для того чтобы автономный робот мог передвигаться и выполнять целенаправленные действия в окружающей среде, ему необходимо понимать, в какой среде он находится – без этого он не сможет эффективно планировать движения, избегать препятствий и достигать пунктов назначения. Существующие методы репрезентации внешней среды имеют ограничения при адаптации к незнакомым неструктурированным средам. Целью работы является разработка концепции и архитектуры системы репрезентации внешней среды на основе мультиагентной нейрокognитивной архитектуры для управления автономными роботами в рамках гетерогенного человеко-машинного коллектива. Научная новизна работы заключается в разработке мультиагентной нейрокognитивной архитектуры системы репрезентации состояния внешней среды. Предложенный подход позволяет создавать гибкие модели мира, способные к самоорганизации и масштабированию при увеличении объема знаний. Методика исследования основана на применении мультиагентных технологий и нейрокognитивных моделей. Разработана мультиагентная нейрокognитивная архитектура, включающая механизмы сбора данных с сенсоров, представления об объектах и субъектах среды, формирование механизма построения причинно-следственных связей, обмен знаниями между участниками гетерогенного человеко-машинного коллектива. Разработанная архитектура обеспечивает возможность масштабирования систем принятия решений и упрощает обмен знаниями между участниками коллектива. Перспективным направлением дальнейших исследований является совершенствование механизмов безопасности системы. Результаты исследования могут быть использованы при разработке автономных робототехнических комплексов нового поколения.

Автономный робот; мультиагентные системы; репрезентация внешней среды; искусственный интеллект.

K.Ch. Brzhikhatlov, I.A. Pshenokova

MULTI-AGENT ARCHITECTURE OF AN ENVIRONMENT REPRESENTATION SYSTEM FOR AN AUTONOMOUS AGRICULTURAL ROBOT

The relevance of this research stems from the need to create effective control systems for autonomous robots capable of operating in uncertain and dynamically changing environments. An environment representation system must address the challenges of localization, mapping, object detection and classification, dynamic prediction, and semantic interpretation. For an autonomous robot to navigate and per-

form goal-directed actions in its environment, it must understand its environment—without this, it will be unable to effectively plan movements, avoid obstacles, and reach destinations. Existing environment representation methods have limitations when adapting to unfamiliar, unstructured environments. The aim of this study is to develop the concept and architecture of an environment representation system based on a multi-agent neurocognitive architecture for controlling autonomous robots within a heterogeneous human-machine team. The scientific novelty of this study lies in the development of a multi-agent neurocognitive architecture for representing the state of the environment. The proposed approach enables the creation of flexible world models capable of self-organization and scalability with increasing knowledge. The research methodology is based on the use of multi-agent technologies and neurocognitive models. A multi-agent neurocognitive architecture has been developed, including mechanisms for collecting data from sensors, representing objects and subjects in the environment, forming a mechanism for constructing cause-and-effect relationships, and sharing knowledge between members of a heterogeneous human-machine team. The developed architecture enables the scalability of decision-making systems and facilitates knowledge sharing between team members. A promising direction for further research is improving the system's safety mechanisms. The results of this study can be used in the development of next-generation autonomous robotic systems.

Autonomous robot; multi-agent systems; environment representation; artificial intelligence.

Введение. Работа автономного робота в неструктурированной реальной среде, к которой относятся условия в полях с посевами, характеризуется динамическими условиями, неопределенностью и частичной наблюдаемостью, что требует реализации систем управления, учитывающих не только контроль препятствий, но и полноценную репрезентацию внешней среды, то есть построение некоторой «картины мира». Подобная система репрезентации должна решать задачи локализации, картографирования, обнаружения и классификации объектов, прогнозирования динамики и семантическую интерпретацию. Для того чтобы автономный робот мог передвигаться и выполнять целенаправленные действия в окружающей среде, ему необходимо понимать, в какой среде он находится – без этого он не сможет эффективно планировать движения, избегать препятствий и достигать пунктов назначения.

Для создания модели внешней среды робот должен иметь глобальную (представляет среду в целом и остается в основном статичной, например, стены различных строений, деревья в поле и т.д.) и локальную (часть среды, которая изменяется более динамично, например, расположение людей и сельхозтехники, перемещающихся вокруг робота) модели среды в виде геометрической и семантической информации. Представления об окружающей среде создаются и обновляются на основе информации, полученной с датчиков робота и других систем наблюдения за средой [1].

В робототехнике существует множество способов представления моделей мира, большинство из которых разработаны специально для использования в навигации.

В работе [2] разработан метод автономной разведки окружающей среды, основанный на использовании двух уровней детализации карты: высокдетализированной локальной и низкодетализированной глобальной, который позволяет роботам эффективно исследовать большие и сложные пространства. Проведенные испытания показали, что предложенный подход демонстрирует повышение эффективности разведки на 80% по сравнению с существующими методами при снижении вычислительных затрат на 50%. Однако исследователи столкнулись с проблемами масштабируемости при расширении базы знаний и увеличении сложности окружающей среды и ограниченной способности к семантическому пониманию среды на уровне человеческого восприятия.

В работах [3–6] представлены различные алгоритмы активного восприятия внешней среды для автономных роботов различного назначения. Исследования предлагают множество методов решения проблемы репрезентации внешней среды. Однако, далеко не все подходы к реализации систем активного восприятия в равной степени эффективны.

В работе [7] рассматривается проблема построения искаженного перцептивного пространства роботом на основе ограниченного сенсорного ввода. Авторами было показано, что как бы ни была искажена карта пространства она позволяет роботу эффективно ориентироваться и демонстрирует, что функциональные представления могут возникать из воплощенного опыта даже без явной пространственной информации или сложных алгоритмов отображения. Стратегия случайного блуждания, представленная в работе, обеспечивает самоорганизующийся процесс обучения для структурирования информа-

ции и навигации. Однако исследования проводились в упрощённой среде с ограниченным количеством сенсорных модальностей, и представленная стратегия может быть неоптимальной для обучения более сложным задачам навигации.

В работе [8] разработана когнитивная навигационная система, которая включает три компонента. Первый компонент – система семантического моделирования (SMF), которая создаёт базу данных об окружающей среде с использованием тройной онтологической семантической модели для представления знаний. Второй компонент – модуль обработки семантической информации (SIP) отвечает за активное восприятие среды, распознавание и локализацию объектов и обеспечивает сбор и анализ данных и их передачу в третий компонент. Третий компонент – модуль автономной семантической навигации (SAN), который осуществляет планирование поведения робота и интегрирован с базой знаний и базой поведенческих моделей для планирования действий, принятия решений и выполнения задач. Экспериментальные исследования, проведенные на роботизированной платформе, подтвердили эффективность предложенного подхода к когнитивной навигации. Однако, предложенная модель имеет ограничения при работе с динамически изменяющейся средой сложностью интеграции компонентов системы.

Еще одним направлением исследований являются методы оптимизации управления в условиях неполноты данных. В [9–11] предлагается метод коллективного анализа внешней среды группой автономных агентов в условиях неполных данных на основе алгоритма поиска жуков-усачей, основанного на поиске пищи жуками с помощью своих антенн. В [12–14] представлены методы нечеткой логики в управлении мобильными роботами.

Современные системы репрезентации внешней среды активно развиваются и эволюционируют, так как улучшаются сенсоры, распределенные вычисления и методы искусственного интеллекта. Однако основной проблемой при решении задачи репрезентации внешней среды остается проблема адаптации к произвольным средам с минимальным обучением [15]. Для решения этой проблемы мы предлагаем использовать методы мультиагентной самоорганизации нейрокогнитивных архитектур автономных программных или роботизированных агентов.

Целью работы является разработка концепции и архитектуры системы репрезентации внешней среды на основе мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры для управления автономными роботами в рамках гетерогенного человеко-машинного коллектива.

Архитектура системы репрезентации внешней среды. Для обеспечения эффективного выполнения поставленных перед автономным роботом задач в реальных условиях необходима максимально полная репрезентация состояния внешней. Причем выполнение комплексных задач зачастую требует использование гетерогенного человеко-машинного коллектива, который может состоять из разных специалистов людей, роботов различной конструкции и назначения, а также же группы программных интеллектуальных агентов. В этом случае репрезентация внешней среды в рамках систем принятия решений отдельных роботов требует обмена данными между участниками коллектива и построения общей картины мира, представляющей собой некоторую онтологию внешней среды. Подобная картина мира (рис. 1) должна включать описание объектов внешнего мира (включая их свойства, возможные виды действий, связанные с объектом события и их эмоциональные оценки. Причем в модели должны быть не только наблюдаемые объекты, но и все объекты, существование которых предполагается в среде (например, те, о наличии которых система может знать из контекста условий среды или поставленной задачи). Стоит отметить, что для повышения эффективности работы все сущности (в том числе и объекты) должны быть сгруппированы по близости свойств и схожему поведению.

Отдельно от объектов, чье поведение можно достаточно просто спрогнозировать, выделяются субъекты (преактивные агенты в среде). Они, в отличие от объектов имеют собственную модель мира (которая может значительно отличаться от картины мира системы управления текущим роботом), собственные цели, планы их достижения и методы коммуникации, позволяющие воздействовать на них. К подобным субъектам можно отнести других роботов, людей, животных, причем как независимых, так и участвующих в решении общих задач в рамках человеко-машинного коллектива.

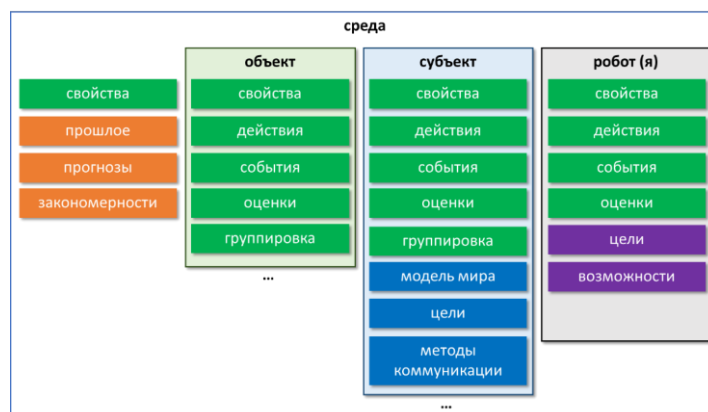


Рис. 1. Структура «модели мира» в системе принятия решений автономного робота

Еще одной важной частью модели мира является представление робота о самом себе, включающее не только описание свойств, действия и событий со своим участием, но и модель цели и возможностей робота. Внешняя среда в подобной модели мира тоже описывается некоторым набором свойств, а также в ней можно выделить описание прошлого, набор прогнозов и описание выявленных закономерностей.

Для построения подобной модели автономный робот должен собирать информацию об объектах окружающей среды не только со своей сенсорной подсистемы, но и за счет обмена данными с другими роботами и людьми, входящими в коллектив. То есть система репрезентации внешней среды должна включать набор систем коммуникации с внешними контрагентами. В качестве основы подобной системы рассматривается возможность использования интеллектуальной системы управления автономным мобильным роботом на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур [16]. Архитектура предложенной модели представлена на рис. 2. Источниками знаний о внешней среде являются сенсоры мобильного робота, которые фиксируют объекты реальной среды, включая других роботов и людей. Все полученные сенсорами данные отправляются в программу моделирования мультиагентных нейрокогнитивных архитектур, где передаются в виде сообщений для соответствующих агентов сенсорного типа. После сбора данных с сенсоров начинают работать агенты, отвечающие за распознавание. Распознанные объекты, действия, события и их признаки участвуют в фиксации событий, то есть формируют модель текущего состояния видимой части мира. Эти данные становятся основой построения модели мира (то есть фиксируют настоящее). После оценки событий и выделения из них наиболее важных (как позитивных, так и негативных) запускается процесс моделирования возможных сценариев развития в виде «графа проблемной ситуации». В результате синтеза целей и построения плана действия (выбора пути в этом графе) формируется представление о возможном будущем и запускается процесс управления роботом. За управление отвечают агенты-эффекторы, команды с которых передаются на доступные эффекторы робота. Стоит отметить, что информация от участников человеко-машинного коллектива может быть получена не только за счет фиксации сенсорами, но и за счет использования различных систем коммуникации (например, естественно-языкового интерфейса с пользователями или системы беспроводной связи между роботами). Причем, использование систем коммуникации позволяет получать информацию о объектах, которые не доступны роботу напрямую, т.е., если хотя бы один из участников группы видит препятствие, все участники включают этот препятствие в свои модели внешней среды. Также стоит отметить, что в модели мира одного робота должно быть представление о существовании собственных моделей мира и графов проблемной ситуации у всех остальных проективных агентов среды (других роботов, людей и даже животных). Модель мира в такой архитектуре формируется из зафиксированных событий (настоящее и прошлое), связей между ними (например, связей причина-следствие) и прогнозов на будущее (набора графов проблемной ситуации).

Представленная архитектура, за счет использования мультиагентной архитектуры может достаточно легко адаптироваться под различные условия (под различные конфигурации робота, разных контрагентов в человеко-машинном коллективе, разные условия среды и разные типы задач). При этом использование множества агентов позволяет разделить вычисления между отдельными вычислителями, что заметно упрощает масштабирование системы при заметном увеличении количества агентов и размеров их базы знаний в мультиагентной архитектуре.

Стоит отметить необходимость обеспечения работоспособности системы при сбое сенсорно-эффекторной подсистемы, неполноте знаний и возможных попытках нарушения кибербезопасности. Для этого предусмотрен отдельный программно-аппаратный модуль, обрабатывающий и фильтрующий все входящие сигналы и команды на эффекторы.

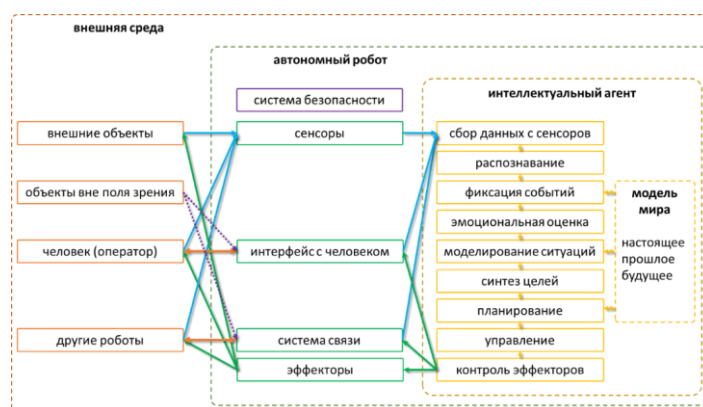


Рис. 2. Архитектура системы репрезентации внешней среды

В качестве примера представлена схема восприятия внешней среды (рис. 3) для автономного робота, предназначенного для защиты растений (рис. 4), разработанного и изготовленного в КБНЦ РАН для автономного мониторинга и обработки посевов [17]. На схеме робот получает информацию о видимом объекте «дерево» и субъекте «корова» за счет прямого анализа данных с сенсоров (линии, обозначенные символом s) и может воздействовать на них своими эффекторами (линии e). Также робот может взаимодействовать с контрагентами «фермер» и «робот» (другой робот, предназначенный для перемещения грузов по полю) с помощью системы коммуникации (линии, обозначенные c) и за счет этого расширять свою картину мира. Например, недоступный для текущего робота объект «пшеница» попадает в его картину мира за счет сигнала от сенсоров другого робота (s^*). Похожим образом реализовано воздействие на недоступный объект за счет «просьбы» для другого робота (c^*). При этом картина мира текущего робота учитывает, что человек знает о существовании дерева, роботов и коровы, а другой робот знает еще и о пшенице. Причем робот не передает ту часть мира, информация о котором уже согласована, то есть у контрагента мы получаем информацию о пшенице и о нем самом.

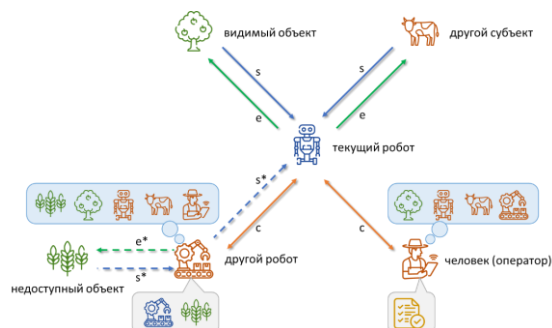


Рис. 3. Схема восприятия внешней среды на примере автономного сельскохозяйственного робота

В такой реализации обмена моделями мира объем передаваемых данных зависит от количества объектов интереса, участников человеко-машинного коллектива и полноты информации о их картине мира и определяется как:

$$V = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^n e_j^i + \sum_{k=0}^o d_k^i \right) - \sum_{k=0}^o d_k^c,$$

где e_j^i – объем данных об j -ом объекте, обнаруженном i -ым роботом, d_k^i – объем данных о k -ом событии или закономерности, обнаруженном i -ым роботом, d_k^c – объем знаний текущего робота (c – индекс текущего робота), m – количество контрагентов, n – количество объектов в среде o – количество ранее зафиксированных событий и закономерностей, влияющих на выполнение текущей задачи.



Рис. 4. Внешний вид робота-агрозащитника

То есть на этапе знакомства со средой роботы обмениваются значительным объемом данных, но в процессе совместной работы картины мира каждого робота приближаются к максимально полной общей картине, что позволяет заметно снизить объем передаваемых данных ($d_k^c \gg d_k^i$).

Мультиагентная архитектура репрезентации состояния внешней среды. Для реализации предложенной системы репрезентации состояния внешней среды предполагается использование интеллектуальных агентов на базе мультиагентных нейрокогнитивных моделей головного мозга. Подобный интеллектуальный агент представляет из себя набор отдельных агентов-нейронов, которые, в отличие от классических нейронных сетей, обладают собственной базой знаний, представленной набором продукционных правил. Кроме того, агенты-нейроны могут обмениваться сообщениями и энергией, имеют собственную целевую функцию, связанную с максимизацией внутренней энергии и возможности динамического заключения и расторжения контрактов между собой [18]. Нейроны разделены на группы, отвечающие за различные алгоритмы поведения реальных нейронов в разных областях мозга. В частности, в предложенной модели можно выделить агентов, отвечающих за репрезентацию объектов, действия, свойств, событий и т.д. Подобная архитектура в перспективе может позволить реализовать формирование подробных онтологий мира и обеспечение принятия решений без необходимости подготовки размеченных обучающих выборок больших объемов.

Например, при работе робота сигнал с камеры может сформировать агента, отвечающего за репрезентацию робота-сборщика урожая. На рис. 5 показана схема мультиагентного алгоритма процесса фиксации поведения контрагентов в мультиагентной нейрокогнитивной архитектуре. Если во время работы этот робот выполняет какие-либо действия – агент «сборщик» заключает контракты с соответствующими агентами-

действиями, после чего объект и действие создают или заключают контракт с агентом-событием. В представленном примере это событие «сборщик видит пшеницу» и «сборщик собирает пшеницу».

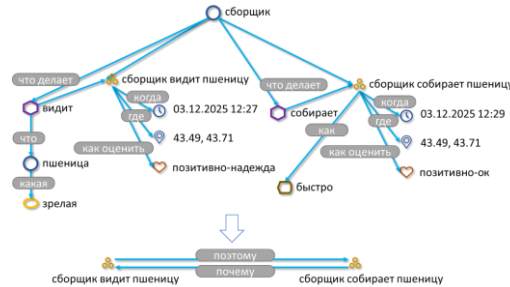


Рис. 5. Мультиагентная нейрокогнитивная архитектура процесса фиксации поведения контрагентов

Как видно из рисунка, кроме указанных агентов в процессе работы задействованы агенты, отвечающие за признаки объектов, действий и событий (свойство «зрелая» заключает контракт с объектом «пшеница», признак «быстро» - с действием «собирает», локация, время и эмоция – с событиями). В результате работы происходит не только фиксация всех событий в среде, но и формирование причинно-следственных связей между агентами-событиями [19]. Подобные причинно-следственные связи, собранные по данным о поведении контрагентов, позволят строить модель их поведения, что в итоге упростит задачу планирования поведения робота в сложных условия реальной среды.

Как упоминалось выше, планирование представляет поиск пути на графе проблемной ситуации (рис. 6), состоящем из описания текущей ситуации и набора вершин, соответствующих возможным вариантам поведения, реакции внешней среды на поведение и прогнозируемой ситуации.



Рис. 6. Схема графа проблемной ситуации

Текущая или прогнозируемая ситуация описывается набором событий и их эмоциональной оценкой, варианты поведения – набором управляющих команд, которые может выполнить робот. Стоит отметить, что реакция среды включает в себя модели графа проблемной ситуации для проактивных контрагентов. Для остальных объектов внешней среды модель основана на причинно-следственных связях.

Для разработки и тестирования мультиагентных архитектур, предназначенных для создания модели внешней среды, используется собственное программное обеспечение [20]. На рис. 7 показан скриншот редактора мультиагентных нейрокогнитивных архитектур, в котором проводится тестирование создания причинно-следственных связей, описывающих взаимодействие объектов в модели окружающей среды.

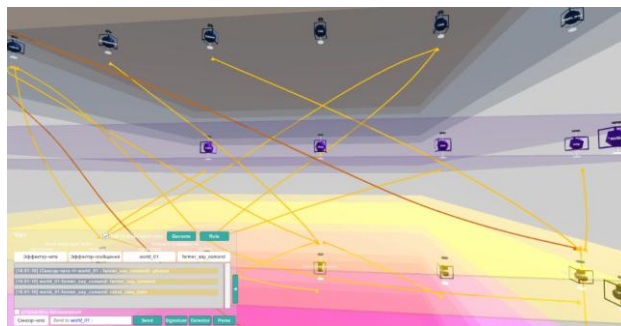


Рис. 7. Скриншот редактора мультиагентных нейрокогнитивных архитектур

Программа позволяет подключать агенты-сенсоры к реальной сенсорной подсистеме робота, передавать команды с эффекторов, а также обеспечивает текстовый интерфейс с оператором. Для отображения генерируемой мультиагентной архитектуры используется трехмерная визуализация, где каждый тип агентов-нейронов обозначен собственной моделью, а связи показаны в виде линий между агентами. В дальнейшем планируется доработка архитектуры и тестирования на данных, собранных роботов в условиях тестового полигона.

Заключение. Представлена структура модели мира и архитектура системы репрезентации состояния внешней среды на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. В модели мира разделено представление о объектах и проактивных субъектах, в том числе и участниках человека-машинного коллектива, выполняющего общую задачу. Представленная архитектура предполагает не только фиксацию состояния среды за счет собственной сенсорной системы робота, но и обмен базами знаний между участниками гетерогенного человека-машинного коллектива.

Использование мультиагентных нейрокогнитивных архитектур в перспективе упростит обмен знаниями (за счет прямой передачи событий и связей между ними в виде описания агентов) и обеспечит возможность масштабирования систем принятия решений за счет распределенного моделирования поведения агентов в архитектуре.

Стоит отметить, что в представленной концепции не рассмотрены вопросы безопасности системы. В частности, необходима защита от подмены данных на сенсоры, перехвата управления эффекторами роботов и утечки данных, передаваемых между участниками коллектива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rakhmatillaev J., Bucinskas V., Kabulov N. An integrative review of control strategies in robotics // *Robotic Systems and Applications*. – 2025. – Vol. 5, No. 2. – P. 50-74. – <https://doi.org/10.21595/rsa.2025.25014>.
2. Cao C., et al. Representation granularity enables time-efficient autonomous exploration in large, complex worlds // *Science Robotics*. – 2023. – Vol. 8, No. 80. – eadf0970. – <https://doi.org/10.1126/scirobotics.adf0970>.
3. Lluvia I., Lazkano E., Ansuategi A. Active mapping and robot exploration: A survey // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21, No. 7. – P. 2445. – <https://doi.org/10.3390/s21072445>.
4. Magalhães S.A., Moreira A.P., Santos F.N.D., Dias J. Active perception fruit harvesting robots - A systematic review // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. – 2022. – Vol. 105, No. 1. – P. 14. – <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01595-3>.
5. Верхованцев Д.В. Алгоритмы активного восприятия внешней среды для автономного мобильного робота // *Системная инженерия и инфокоммуникации*. – 2025. – № 1(1). – С. 11-16. – <https://doi.org/10.5281/zenodo.15110923>.
6. Беляков М.Э., Диане С. Алгоритмы визуального анализа внешней среды автономным мобильным роботом в задаче уборки территории // *Russian Technological Journal*. – 2023. – Т. 11 (4). – С. 26-35. – <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-4-26-35>.
7. Warutumo D., et al. Perceptual Distortions and Autonomous Representation Learning in a Minimal Robotic System // *arXiv preprint arXiv:2507.07845*. – 2025. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.07845>.

8. Joo S.-H., Manzoor S., Rocha Y.G., Bae S.-H., Lee K.-H., Kuc T.-Y., Kim M. Autonomous navigation framework for intelligent robots based on a semantic environment modeling // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10, No. 9. – P. 3219. – <https://doi.org/10.3390/app10093219>.
9. Павелина Ю.А., Попов И.Ю. Метод коллективного анализа внешней среды автономными агентами в условиях неполноты данных на основе алгоритма жуков-усачей // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2025. – Т. 25, № 6. – С. 1160-1167. – <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2025-25-6-1160-1167>.
10. Chen C., et al. A comprehensive survey of convergence analysis of beetle antennae search algorithm and its applications // *Artificial Intelligence Review*. – 2024. – Vol. 57, No. 6. – P. 141. – <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10789-0>.
11. Shan X., et al. Hybrid Strategy Improved Beetle Antennae Search Algorithm and Application // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14, No. 8. – P. 3286. – <https://doi.org/10.3390/app14083286>.
12. Мамедова Б.А.Г., Ибадов С.С. Нечеткая логика в управлении мобильными роботами методы // *Национальная ассоциация ученых*. – 2022. – № 75-2. – С. 27-29.
13. Khairudin M., et al. The mobile robot control in obstacle avoidance using fuzzy logic controller // *Indonesian Journal of Science and Technology*. – 2020. – Vol. 5, No. 3. – P. 334-351.
14. Riman C.F., Abi-Char P.E. Fuzzy logic control for mobile robot navigation in automated storage // *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. – 2023. – Vol. 12, No. 5. – P. 313-323.
15. Wei Q., et al. Copeft: Fast adaptation framework for multi-agent collaborative perception with parameter-efficient fine-tuning // *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. – 2025. – Vol. 39, No. 22. – P. 23351-23359.
16. Нагоев З.В. Интеллектика, или мышление в живых и искусственных системах. – Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2013. – 211 с.
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(239). – С. 6-18.
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. Пишенокова И.А., Бжыхатлов 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.
20. Пишенокова И.А., Нагоева О.В., Апишев 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.

REFERENCES

1. Rakhmatillaev J., Bucinskas V., Kabulov N. An integrative review of control strategies in robotics, *Robotic Systems and Applications*, 2025, Vol. 5, No. 2, pp. 50-74. Available at: <https://doi.org/10.21595/rsa.2025.25014>.
2. Cao C., et al. Representation granularity enables time-efficient autonomous exploration in large, complex worlds, *Science Robotics*, 2023, Vol. 8, No. 80, eadf0970. Available at: <https://doi.org/10.1126/scirobotics.adf0970>.
3. Lluvia I., Lazkano E., Ansuategi A. Active mapping and robot exploration: A survey, *Sensors*, 2021, Vol. 21, No. 7, pp. 2445. Available at: <https://doi.org/10.3390/s21072445>.
4. Magalhães S.A., Moreira A.P., Santos F.N.D., Dias J. Active perception fruit harvesting robots - A systematic review, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2022, Vol. 105, No. 1, pp. 14. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01595-3>.
5. Verkholantsev D.V. Algoritmy aktivnogo vospriyatiya vneshney sredy dlya avtonomnogo mobil'nogo robota [Algorithms for active perception of the external environment for an autonomous mobile robot], *Sistemnaya inzheneriya i infokommunikatsii* [Systems Engineering and Infocommunications], 2025, No. 1(1), pp. 11-16. Available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15110923>.
6. Belyakov M.E., Diane S. Algoritmy vizual'nogo analiza vneshney sredy avtonomnym mobil'nym robotom v zadache uborki territorii [Algorithms for visual analysis of the external environment by an autonomous mobile robot in the task of cleaning the territory], *Russian Technological Journal*, 2023, Vol. 11(4), pp. 26-35. Available at: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-4-26-35>.

7. Warutumo D., et al. Perceptual Distortions and Autonomous Representation Learning in a Minimal Robotic System, *arXiv preprint arXiv:2507.07845*, 2025. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.07845>.
8. Joo S.-H., Manzoor S., Rocha Y.G., Bae S.-H., Lee K.-H., Kuc T.-Y., Kim M. Autonomous navigation framework for intelligent robots based on a semantic environment modeling, *Applied Sciences*, 2020, Vol. 10, No. 9, pp. 3219. Available at: <https://doi.org/10.3390/app10093219>.
9. Pavelina Yu.A., Popov I.Yu. Metod kolektivnogo analiza vneshney sredy avtonomnymi agentami v usloviyakh nepolnoty dannykh na osnove algoritma zhukov-usachey [Method of collective analysis of the external environment by autonomous agents under conditions of incomplete data based on the longhorn beetle algorithm], *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2025, Vol. 25, No. 6, pp. 1160-1167. Available at: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2025-25-6-1160-1167>.
10. Chen C., et al. A comprehensive survey of convergence analysis of beetle antennae search algorithm and its applications, *Artificial Intelligence Review*, 2024, Vol. 57, No. 6, pp. 141. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10789-0>.
11. Shan X., et al. Hybrid Strategy Improved Beetle Antennae Search Algorithm and Application, *Applied Sciences*, 2024, Vol. 14, No. 8, pp. 3286. Available at: <https://doi.org/10.3390/app14083286>.
12. Mamedova B.A.G., Ibadov S.S. Nechetkaya logika v upravlenii mobil'nymi robotami metody [Fuzzy logic in the control of mobile robots], *Natsional'naya assotsiatsiya uchenykh* [National Association of Scientists], 2022, No. 75-2, pp. 27-29.
13. Khairudin M., et al. The mobile robot control in obstacle avoidance using fuzzy logic controller, *Indonesian Journal of Science and Technology*, 2020, Vol. 5, No. 3, pp. 334-351.
14. Riman C.F., Abi-Char P.E. Fuzzy logic control for mobile robot navigation in automated storage, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2023, Vol. 12, No. 5, pp. 313-323.
15. Wei Q., et al. Copeft: Fast adaptation framework for multi-agent collaborative perception with parameter-efficient fine-tuning, *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2025, Vol. 39, No. 22, pp. 23351-23359.
16. 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.
17. Bzhikhatlov K.Ch., Pshenokova I.A., Makoev A.R. Kontseptsiya sozdaniya sistemy upravleniya mul'tiagentnoy robototekhnicheskoy sistemoy sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya na baze neyrokognitivnykh algoritmov [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(239), pp. 6-18.
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. 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.
20. Pshenokova I.A., Nagoeva O.V., Apshev A.Z., Enes A.Z. Formirovanie dinamicheskikh prichinnosledstvennykh 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* [News 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.

Бжихатлов Кантемир Чамалович – ФГБНУ «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; e-mail: haosit13@mail.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: +79631663448; к.ф.-м.н.; зав. лабораторией «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы».

Пшенокова Инна Ауесовна – Институт информатики и проблем регионального управления – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр «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».

Bzhikhatlov Kantemir Chamalovich – Federal public budgetary scientific establishment «Federal scientific center «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».

Pshenokova Inna Auesovna – Institute of Computer Science and Problems of Regional Management, 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 «Intellectual'nyye sredy obitaniya».

УДК 28.23.24: 28.23.27: 004.82

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-81-93

С.М. Соколов, А.А. Богуславский, А.Б. Бугеря, М.А. Ильенков

МЕТОД КОНТРОЛЯ ПРОСТРАНСТВА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМОЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

С ростом востребованности подвижных робототехнических комплексов с повышенной степенью автономности существенно возрастает требование их информационной осведомлённости. В обеспечении этой осведомлённости ведущее место занимают системы технического зрения. Для поддержки функционирования группировок, как и каждого, отдельно взятого робота, требуется формирование информационного поля, позволяющего оперативно принимать решения в системах управления как отдельными роботами, так и всей группировкой в целом. Желание возложить на РТК всё большее число самостоятельно решаемых задач требует от СТЗ всё более широкого и детального рассмотрения области функционирования. Распределённые системы наблюдения и контроля пространства являются одним из перспективных направлений решения данной задачи, обеспечивая формирование единого информационного поля на основе кооперативного восприятия, совместной локализации и семантической интерпретации обстановки. В работе рассматривается задача контроля распределённой системой технического зрения заданной области пространства с целью обнаружения в этой области объектов интереса с известным характерным размером. При этом предполагается возможность расположения видеокамер как на наземных, так и на воздушных средствах. Описывается компоновка распределённой системы технического зрения для решения сформулированной задачи. Ядром описываемой системы является унифицированный информационный модуль со всенаправленным регистрирующим блоком. Модуль выступает агентом распределённой СТЗ. Несколько таких модулей распределяются по указанной на карте области пространства с учётом особенностей рельефа и других объектов, располагающихся в этой области. Решается задача выбора оптимального по ряду критериев состава распределённой системы. Предлагается методика планирования расположения агентов с заданными характеристиками регистрирующих блоков по заданной 3D-карте местности для обеспечения обнаружения объектов интереса с известными характерными размерами. Приводится алгоритм расчёта мест расположения СТЗ с фиксированными полями зрения для контроля заданного участка пересечённой местности на предмет выявления статичных объектов с известными характерными размерами и отличием от окружающего фона по отражающей способности либо перемещающихся объектов.

Автономность роботов; информационное обеспечение; система технического зрения; унификация решений в области автономии.

S.M. Sokolov, A.A. Boguslavsky, A.B. Bugerya, M.A. Ilienkov

METHOD OF SPACE CONTROL BY A DISTRIBUTED VISION SYSTEM

With the growing demand for mobile robotic complexes with an increased degree of autonomy, the demand for their information awareness increases significantly. Vision systems play a leading role in ensuring this awareness. To support the functioning of groups, as well as each individual robot, it is necessary to form an information field that allows for prompt decision-making in the control systems of both individual robots and the entire group as a whole. The desire to assign an increasing number of independently solved tasks to the robotic complexes requires an increasingly broad and detailed consideration of the field of operation from the VS. Distributed space surveillance and control systems are one of the promising areas for solving this problem, ensuring the formation of a unified information field based on cooperative perception,

joint localization and semantic interpretation of the situation. The paper considers the problem of monitoring a given area of space by a distributed vision system in order to detect objects of interest with a known characteristic size in this area. At the same time, it is assumed that video cameras can be located on both ground and air vehicles. The layout of a distributed vision system for solving the formulated problem is described. The core of the described system is a unified information module with an omnidirectional recording unit. The module acts as an agent of the distributed VS. Several such modules are distributed over the area of space indicated on the map, taking into account the terrain features and other objects located in this area. The problem of choosing the optimal composition of a distributed system according to a number of criteria is solved. A methodology is proposed for planning the location of agents with specified characteristics of recording units on a given 3D terrain map to ensure the detection of objects of interest with known characteristic dimensions. An algorithm is given for calculating the locations of VS with fixed fields of view for monitoring a given area of rough terrain in order to identify static objects with known characteristic dimensions and differences from the surrounding background in reflectivity or moving objects.

Robot autonomy; information support; vision system; unification of autonomy robotics solutions.

Введение. С ростом востребованности подвижных робототехнических комплексов (РТК) с повышенной степенью автономности (ПСА) существенно возрастает требование их информационной осведомлённости. В этой осведомлённости ведущее место занимают системы технического зрения (СТЗ). СТЗ – глаза роботов, обеспечивающие формирование описания окружающей среды на основе зрительных данных. Ещё одной тенденцией в использовании РТК является их групповое применение, причём в этих группах объединяются разнородные и разнотипные РТК (воздушные, наземные, различных классов и назначения). Для обеспечения функционирования таких группировок, как и каждого отдельно взятого робота, требуется формирование единого информационного поля, позволяющего оперативно принимать решения в системах управления как отдельными роботами, так и всей группировкой в целом.

Современные исследования в области кооперативного восприятия показывают, что информационное поле может формироваться на различных уровнях совмещения данных: от обмена «необработанными» сенсорными измерениями до передачи признаков, объектов и семантических описаний сцены. В работе Bai и др. [1] предложена иерархическая модель кооперативного восприятия для гетерогенных систем, в которой рассматриваются архитектуры объединения данных от различных сенсорных узлов. Экспериментальные исследования и специализированные наборы данных (например, TUMTraF V2X [2]) демонстрируют, что кооперативное объединение наблюдений существенно повышает полноту обнаружения объектов и устойчивость к перекрытиям образов объектов по сравнению с одиночными платформами.

Фундаментом построения общего информационного пространства для группы РТК выступают методы совместной локализации и картирования (Collaborative SLAM). В децентрализованных решениях, таких как DVM-SLAM [3], показана возможность построения согласованной карты среды и совместной локализации агентов без централизованного управляющего узла, что особенно важно при ограничениях по пропускной способности каналов связи и при динамическом составе группы. В работах, ориентированных на кооперацию воздушных и наземных платформ, демонстрируется, что объединение данных от разнородных РТК (беспилотный летательный аппарат (БЛА) – наземный робототехнический комплекс (НРТК)) позволяет повысить точность глобальной привязки и обеспечить более полное покрытие наблюдаемой области [4, 14].

Однако геометрическое описание среды (карта и положение объектов) является лишь одним из уровней информационного поля. Для поддержки принятия решений требуется семантическая интерпретация наблюдаемой обстановки. Подходы к формированию семантической ситуационной осведомлённости, рассмотренные в [5], предполагают интеграцию результатов детекции, распознавания и прослеживания объектов в единое представление, пригодное для использования в системах управления. Дополнительные аспекты обработки видеопотоков от нескольких мобильных платформ и организации коллективного анализа обстановки рассматриваются в [6], где подчёркивается важность согласованности представлений и минимизации ложных интерпретаций.

Особую актуальность в разнородных группах РТК приобретает объединение данных, полученных с различных ракурсов наблюдения. В обзоре [7] показано, что совмещение «собственного» взгляда НРТК и «внешнего» наблюдения (например, с БЛА) по-

звolyет существенно расширить зону контролируемого пространства и повысить достоверность распознавания объектов и событий. Для групп НРТК это означает возможность формирования более целостного и устойчивого информационного поля.

В более широком контексте автономных и многоагентных систем [3, 8] информационная осведомлённость рассматривается как результат интеграции модулей восприятия, планирования и кооперации. При этом распределённые системы наблюдения/контроля пространства выделяются как одно из ключевых направлений повышения автономности. Накопленные исследования по кооперативным системам SLAM [9, 10] подтверждают, что распределённая обработка визуальной информации и совместное исследование пространства позволяют повысить масштабируемость и отказоустойчивость групп РТК.

Желание возложить на РТК всё большее число самостоятельно решаемых задач требует от СТЗ всё более широкого и детального рассмотрения области функционирования. Распределённые системы наблюдения и контроля пространства являются одним из перспективных направлений решения данной задачи, обеспечивая формирование единого информационного поля на основе кооперативного восприятия, совместной локализации и семантической интерпретации обстановки.

В работе рассматривается задача контроля распределённой системой технического зрения заданной области пространства с целью обнаружения в этой области объектов интереса, имеющих известный характерный размер. При этом предполагается возможность расположения видеокамер как на наземных, так и на воздушных средствах. Пример формулировки подобной задачи, который рассматривается в работе, следующий. В заданной 2D картой и картой высот области пространства расположить необходимое число агентов со всенаправленными регистрирующими блоками с заданными характеристиками по разрешению с целью обнаружения в этой области объектов, имеющих заданный характерный размер.

Приводится компоновка распределённой системы технического зрения (РСТЗ) для решения сформулированной задачи. Ядром описываемой системы является унифицированный информационный модуль со всенаправленным регистрирующим блоком. Модуль выступает агентом распределённой СТЗ. Кроме того, предлагается методика планирования расположения агентов с заданными характеристиками регистрирующих блоков по заданной 3D-карте местности для обеспечения обнаружения объектов интереса с известными характерными размерами. Описывается алгоритм расчёта мест расположения СТЗ с фиксированными полями зрения для контроля заданного участка пересечённой местности на предмет выявления статичных объектов с известными характерными размерами и отличием от окружающего фона по отражающей способности либо перемещающихся объектов.

Агент распределённой системы. Ядром описываемой системы является унифицированный информационный модуль со всенаправленным регистрирующим блоком. Аппаратную часть модуля образует набор из видеокамер с различными оптическими системами с частично перекрывающимися полями зрения, что обеспечивает сбор зрительных данных в области пространства вокруг места расположения регистрирующего блока с параметрами 360° вокруг вертикальной оси и 120° вокруг горизонтальной оси (рис. 1).

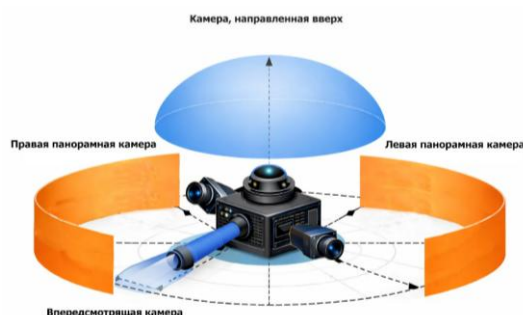


Рис. 1. Схема поля зрения всенаправленного регистрирующего блока

Все видеокамеры по каналам Ethernet подключаются к вычислительно-управляющему блоку (ВУБ), реализующему сбор и обработку зрительных данных и выдающему управляющие сигналы на исполнительные механизмы поворотного устройства, на котором устанавливается агент (рис. 2).

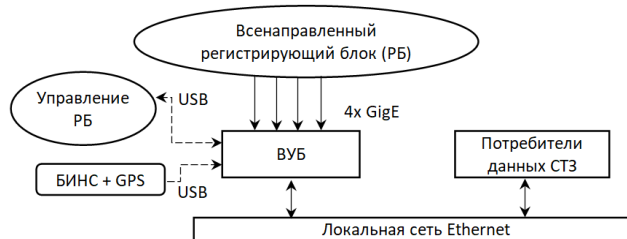


Рис. 2. Схема общей компоновки аппаратной части РСТЗ

Программная часть построена на основе программного каркаса СТЗ РВ [11] и позволяет оперативно маневрировать, как аппаратным составом, так и алгоритмическим наполнением (от простого обнаружения до распознавания и управления воздействием на объект интереса) каждого агента. На рис. 3 показан экран оператора при постановке задачи одному из агентов РСТЗ.

Открытая архитектура программного обеспечения унифицированного информационного модуля [12] позволяет оперативно изменять аппаратный состав модуля (агента) в РСТЗ.

Особенностью предложенных решений является возможность их компоновки доступными средствами аппаратной поддержки и доверенным программным обеспечением. Это обеспечивается следующими приемами:

1) Использование общедоступных аппаратных компонент.

В состав агента входят стандартные IP-видеокамеры с интерфейсом Ethernet и типовые вычислительные платформы компактного исполнения на базе Intel-совместимых процессоров общего назначения. Отсутствие специализированных или уникальных аппаратных решений снижает стоимость системы, упрощает её масштабирование и техническое обслуживание, а также обеспечивает возможность быстрого восстановления работоспособности за счёт замены компонентов из доступной номенклатуры.

2) Модульный принцип построения.

Унифицированный информационный модуль реализован по блочно-модульной архитектуре, что позволяет варьировать состав регистрирующих блоков (тип камер, разрешение, оптические характеристики) без изменения общей логики функционирования системы. Аппаратная и программная части связаны через стандартизированные интерфейсы, обеспечивающие совместимость и расширяемость.

3) Применение стандартных сетевых протоколов.

Передача видеоданных и управляющих сигналов осуществляется по широко распространённым протоколам Ethernet/TCP-IP, USB и CAN, что исключает необходимость в специализированных каналах связи и обеспечивает интеграцию с существующей сетевой инфраструктурой в составе операционных систем общего назначения. Это повышает надёжность, снижает требования к внедрению и облегчает эксплуатацию распределённой системы.

4) Ориентация на доверенное программное обеспечение.

Программная часть построена на базе проверенного авторского программного каркаса СТЗ РВ и может функционировать под управлением сертифицированных операционных систем и библиотек обработки изображений. Использование открытых и документированных интерфейсов обеспечивает прозрачность алгоритмов и контролируемость процессов обработки данных.

5) Масштабируемость и унификация решений.

Архитектура агента допускает тиражирование без изменения базовых принципов построения. Каждый модуль может быть добавлен в распределённую систему с предусмотренной перенастройкой программного каркаса, что подтверждает возможность формирования системы требуемой конфигурации на основе унифицированных компонентов.

6) Гибкость алгоритмического наполнения.

Благодаря разделению уровней сбора данных, их предварительной обработки и принятия решений обеспечивается возможность постепенного усложнения функционала – от задач детектирования до распознавания и управления воздействием.

В совокупности указанные характеристики подтверждают, что предложенные решения обладают не только функциональной завершенностью, но и практической реализуемостью, обеспечивая компоновку распределённой системы технического зрения на основе доступной элементной базы и доверенной программной среды.

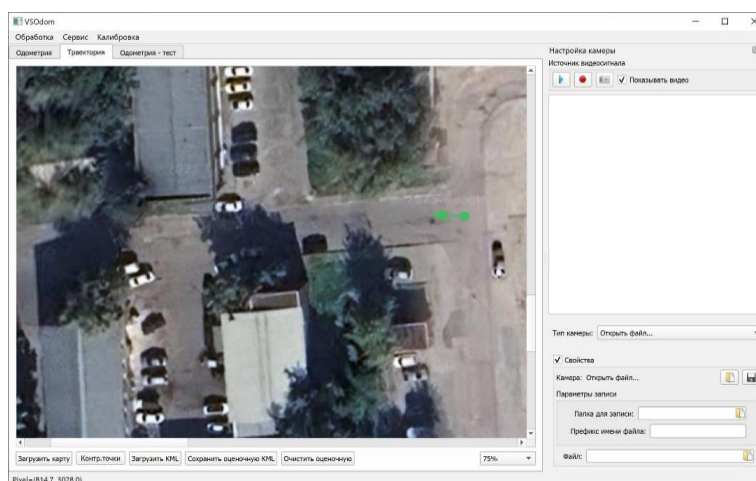


Рис. 3. Экран оператора при постановке задачи агенту РСТЗ

Режимы работы агента. В настоящее время предусмотрены три режима работы агентов РСТЗ: автоматический (автономный), полуавтоматический и режим настройки. В автоматическом режиме агент, заняв отведённое положение переходит в режим обнаружения объекта интереса (ОИ), параметры которого (предпочтительные признаки) заранее введены на борт (в режиме настройки). Если ОИ обнаружен, то агент помещает образ ОИ в центр главного поля зрения и управляя положением поворотного устройства, реализует слежение за этим образом. В полуавтоматическом режиме выполняются те же действия, что и в автоматическом, но после обнаружения ОИ и наведения на него главного поля зрения с помощью трансфокатора выполняется увеличение детальности рассмотрения ОИ и это изображение передаётся оператору. В этой же части может быть произведено автоматическое распознавание ОИ, но алгоритмы распознавания требуют большей вычислительной мощности. Режим настройки позволяет изменять параметры алгоритмов обнаружения и распознавания объектов интереса.

Пульт управления РСТЗ. РСТЗ кроме нескольких описанных агентов включает в свой состав пульт управления с помощью которого реализуется контроль за работой системы. На этом же пульте выполняется расчёт распределения агентов в заданной области пространства и выдача заданий каждому из них.

Аппаратная часть пульта РСТЗ состоит из носимого системного блока и усиливающих блоков-антенн Wi-Fi связи.

Программная часть по выданному заданию (известной 3D карты местности и требований к характерным размерам обнаруживаемых объектов) реализует расчёт мест расположения агентов РСТЗ, выдачу заданий каждому из агентов и контроль за их работой.

В начальной позиции пульт управления и агенты могут располагаться в одной стартовой позиции с расстояниями между участниками порядка нескольких метров. При таком расположении достаточно встроенных антенн для Wi-Fi связи. При включении дополнительных антенн-усилителей в начальной позиции пульт и агенты могут быть удалены друг от друга на расстояния до нескольких сотен метров.

Алгоритм функционирования всей системы следующий.

Включается пульт управления РСТЗ, агенты и подвижные платформы, на которых они установлены. Каждый агент начинает свою работу с информирования центрального пульта о своей готовности принять задание. Система регистрирует количество работоспособных агентов и их характеристики (по дальности обнаружения объектов интереса).

В пульт управления РСТЗ вводится задание на контроль заданной области пространства, производится расчёт/планирование мест расположения агентов.

После расчёта мест расположения агентов реализуется выдвижение (если агент установлен на подвижном основании) или расположение агента в заданном месте и включение заданного режима работы.

На описываемом этапе работ рассматривается такой сценарий использования системы. На вход системы подаётся карта и/или изображение (вид сверху) интересующей области пространства (например, области в которой производится разминирование, и которую надо охранять от проникновения посторонних объектов). Выполняется расчёт расположения агентов и выдаётся задание каждому из них в режиме супервизорного управления оператор – РСТЗ.

Планирование расположения агентов. Для формирования общего информационного пространства группы мобильных средств в целях контроля (обнаружения/слежения) за объектами интереса внутри заданной области пространства в первую очередь необходимо обеспечить полное покрытие полями зрения заданной местности либо набором неподвижных камер, либо мобильными платформами, которые будут следовать по маршруту, с указанными местами расположения камер. Этой цели служит алгоритм для определения оптимального расположения регистрирующих блоков для полного покрытия местности. Под полным покрытием подразумевается обнаружение (и распознавание) объекта интереса заданного размера (в любой момент времени) хотя бы одной камерой.

В стационарном режиме с учетом известной 3D карты местности и требований к характерным размерам обнаруживаемых объектов интереса выполняется расчёт мест расположения наблюдателей. Целью расчета является определение такого расположения агентов, при котором объект интереса заданного размера, расположенный в пределах рассматриваемого участка пересеченной местности, будет наблюдаться хотя бы одним из наблюдателей распределенной системы.

Карта области функционирования системы задаётся в формате карты высот - растрового изображения, яркость пикселей которого определяет высоту точек поверхности [13]. Пример карты высот, которой задается местность, приведен на рис. 4.

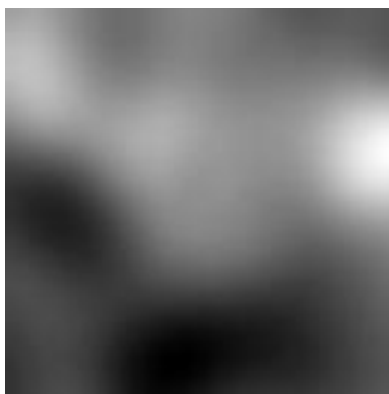


Рис. 4. Пример карты высот

По заданной карте высот строится 3D карта заданной области пространства, на котором будут располагаться агенты (рис. 5).

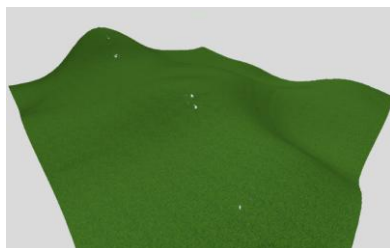


Рис. 5. Пример 3D карты заданной области пространства для расположения агентов

Для определения мест установки агентов необходимо провести анализ области наблюдения (видимости) каждого регистрирующего блока распределенной СТЗ. Анализ области наблюдения (видимости) местности агентом проводится в два этапа: проверка нахождения точки внутри геометрической зоны видимости камеры и проверка ограничения/загораживания видимости объектами рельефа (по карте местности).

Проверка нахождения точки внутри геометрической зоны наблюдения агента выполняется по известным характеристикам его регистрирующего блока. Здесь же определяется максимальная дальность для обнаружения объекта интереса заданного размера. Пример отображения области видимости видеокамеры, установленной на треноге, представлен на рис. 6.

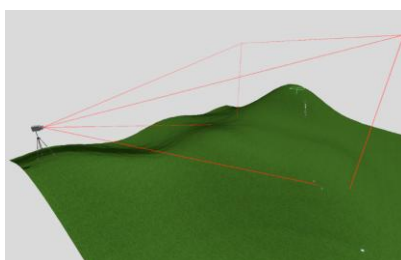


Рис. 6. Пример регистрирующего блока в виде одной видеокамеры на треноге с отображенной пирамидой поля зрения

Объект наблюдается камерой, если расстояние до него не превышает рассчитанную максимальную требуемую дальность обнаружения и вектор наблюдения между камерой и точкой на объекте находится в пределах поля зрения камеры.

Даже если объект находится внутри зоны видимости, видеокамера может не регистрировать его из-за ограничения рельефом местности (рис. 7).

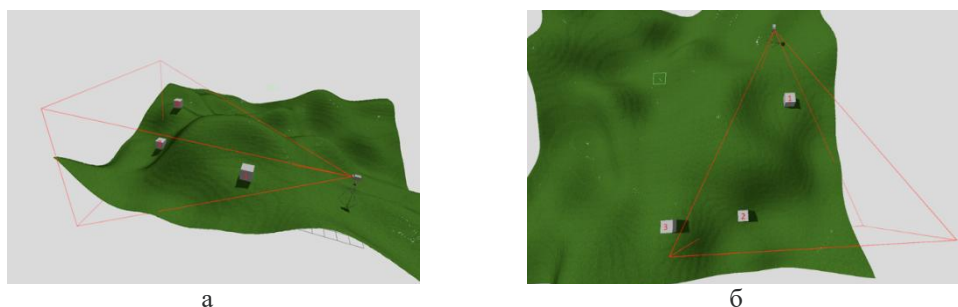


Рис. 7. Пример расположения объектов интереса на карте местности: а – вид сбоку; б – вид сверху. Куб 1 наблюдается с помощью установленной камеры, кубы 2 и 3 – нет: куб 2 находится за холмом, а куб 3 находится вне поля зрения камеры

Решить проблему отсутствия видимости куба 2 и 3 можно (рис. 7), расположив еще одного агента с другой стороны холма. Пример расстановки представлен на рис. 8.

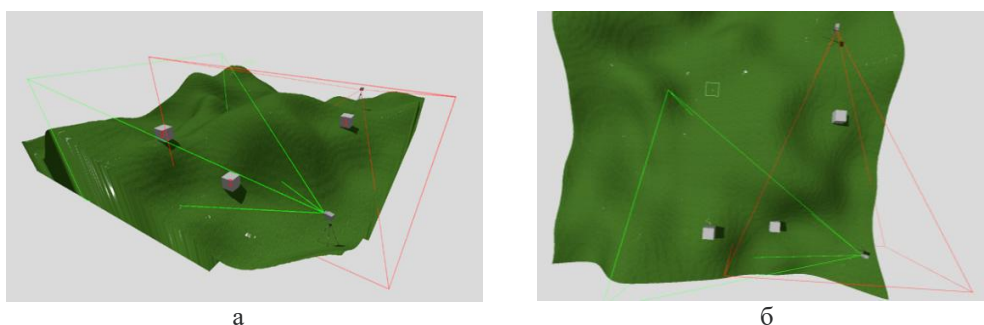


Рис. 8. Устранение «мёртвой» зоны за счет размещения дополнительного агента:
а – вид с боку; б – вид с верху

Видимость может быть ограничена за счет других объектов, находящихся на местности, например, деревьями и кустами. Пример карты местности с расположенными на ней агентом, объектом интереса и лесом представлен на рис. 9.

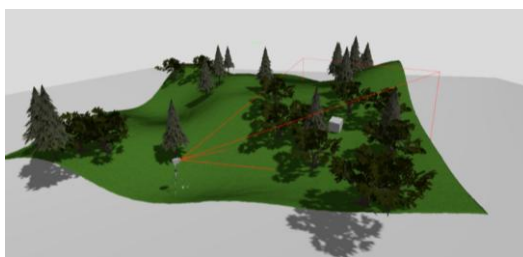


Рис. 9. Пример ограничения поля зрения регистрирующего блока посторонними объектами

Ограничение, возникшее в связи с наличием деревьев на оси визирования, преодолевается с помощью установки дополнительного агента. Место расположения дополнительного агента по известным координатам объектов-затенителей определяется итеративно путем перебора всех возможных вариантов установки наблюдателя. Для получения набора точек-кандидатов карта местности делится на прямоугольную сетку с заданным шагом (дискретизация пространства). Каждая точка этой сетки, в которой не располагаются другие объекты и в которую возможно установить агента (устойчивая поверхность, нет резких перепадов высот) является кандидатом для установки наблюдателя. Шаг определяется в соответствии с требованиями по точности работы системы и по возможностям вычислителя: чем больше шаг, тем ниже точность и тем ниже требования к производительности вычислителя. Для каждой точки-кандидата рассчитывается площадь мертвой зоны, которая будет покрыта за счет дополнительного агента, расположенного в этой точке. Дополнительный агент будет установлен таким образом, чтобы эта площадь была максимальной.

В зависимости от загрузки местности посторонними объектами и сложности рельефа состав системы может изменяться, к примеру, для решения некоторых задач целесообразно (если возможно) использование воздушных средств в дополнение к наземным [14].

Алгоритм определения оптимального расположения агентов. Для определения оптимального положения агентов, необходимо учитывать параметры регистрирующих блоков (РБ), а именно угловое поле зрения, дальность эффективного наблюдения, которая определяется из известных параметров камеры и критерия распознавания объекта интереса. Также необходимо учитывать загораживающие объекты – препятствия, кото-

рые могут располагаться на местности: здания, деревья и другие объекты, которые ограничивают поле зрения камер, в том числе, холмы и впадины, за которыми может находиться объект интереса. Также необходимо учитывать наличие запретных зон для размещения камер: поверхность воды или области с резким перепадом высот.

Задача расстановки наблюдателей на холмистой местности относится к классу NP-трудных [15]. Существует общий подход к ее решению. Согласно этому подходу, необходимо провести анализ и выбор оптимальных точек размещения агентов на основе требуемых критериев. В работе [16] в качестве критериев выбраны критерий максимума покрытия местности (Maximal covering location problem – MCLP) и критерий максимизации резервного покрытия (Backup coverage location problem – BCLP) для обеспечения непрерывного наблюдения в случае ограничения видимости основной камеры для заданной части местности. В алгоритме, представленном Аджай Кошик и соавторами [17]: для уменьшения влияния случайно перемещающихся посторонних объектов на видимость системы оптимизация установки агентов проводится по критерию увеличения количества важных областей (заранее заданные зоны интереса в пространстве наблюдения: входы в здания, тротуары и другие места, на которых происходит много активностей) местности сразу тремя камерами. В работе [18] рассматривается другой критерий/аспект – стоимость сети. Оптимизация проводится выборкой набора камер с минимальной суммарной стоимостью из множества, состоящего из 200 различных моделей, с сохранением покрытия местности на уровне не ниже, чем 80%. В методе, предложенном в [19], в качестве критерия выбрана минимизация количества агентов.

В нашей работе используется алгоритм, в котором в качестве основных критериев выступают MCLP и BCLP (в модернизированном и ранжированном виде), а также в качестве дополнительного средства отбора решений используется критерий минимизации стоимости сети. На данном этапе работы была реализована первая версия алгоритма, которая работает с 2D картой (снимок со спутника) местности и картой высот и учитывает наличие объектов-затенителей и запретных зон для размещения агентов (поверхность воды, резкие перепады высот), которые заранее известны и отмечены на схеме. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 10.

На 2D карте местности, которая подается на вход алгоритма, выделяются объекты сцены: область интереса, здания, зона допустимой установки камер. После этого происходит дискретизация зоны наблюдения и разрешенной зоны установки камер. Разрешенной зоной установки является часть области интереса, исключаящая запрещенные зоны и места расположения объектов-затенителей и зданий. Полученная сетка точек в зоне наблюдения используется для оценки покрытия камерами. Далее происходит генерация кандидатов на размещение камер. Кандидат задается комбинацией параметров: координатой точки установки камеры, которая выбирается из сетки точек разрешенной зоны, и направления наблюдения, которое определяется ориентацией камеры. Определение мест расстановки камер происходит итеративно. Первичная расстановка агентов проводится с помощью жадного алгоритма максимального заполнения рассматриваемой области. На каждом шаге выбирается свободная и доступная для размещения точка, которая дает максимальный прирост покрытия местности (аналог MCLP). После первичного жадного выбора мест установки наблюдателей происходит оптимизация по критерию BCLP за счет перестановок агентов с сохранением полученного уровня покрытия. После оптимизация проверяется соответствие критериям: если выполняются, то на выходе алгоритма получается множество точек для установки камер; если нет – происходит генерация нового размещения камер за счет удаления или перемещения малоэффективных камер (с низким покрытием или с перекрытием с более, чем 1 камерой) в недостаточно покрытые места [16, 18]. По полученному множеству точек для каждого агента системы указывается сектор ответственности в окружающем пространстве. Если агенты расположены на подвижных платформах, то, при необходимости, возможно, как оперативное изменение зон ответственности, так и изменение расположения агентов. Смена места расположения наблюдателей является очень полезной особенно в случаях выхода из строя одного из агентов. Архитектура многоагентных систем позволяет компенсировать отказы за счет других наблюдателей [20]. В таких ситуациях возможно провести повторную оптимизацию и выбор новых точек размещения агентов с целью минимизации непокрытых мертвых зон.

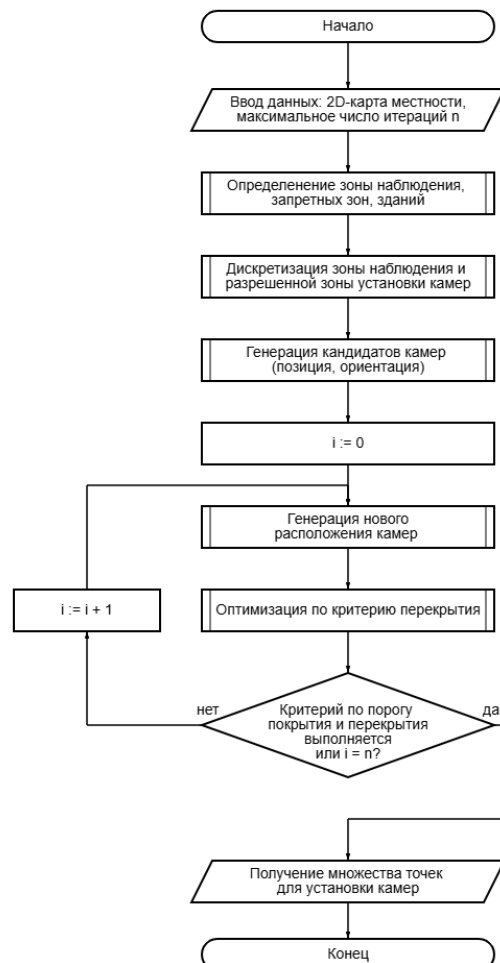


Рис. 10. Блок-схема алгоритма получения точек установки камер

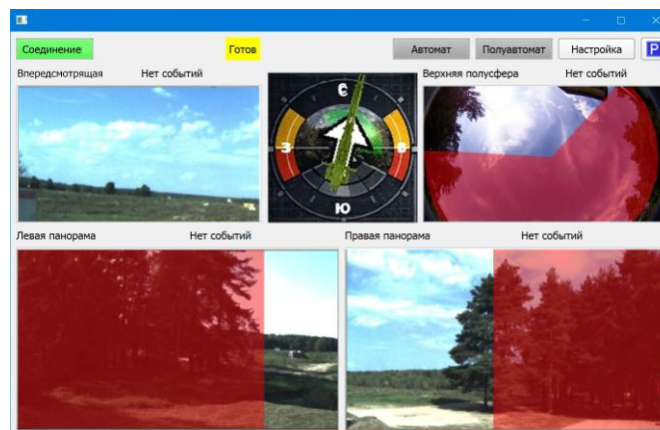


Рис. 11. Пример указания сектора ответственности в полях зрения всенаправленного РБ

Оснащение агентов всенаправленными регистрирующими блоками позволяет ещё больше повысить надёжность контроля заданной области пространства и избежать дополнительных перемещений агентов РСТЗ. При изменении зон ответственности, предпо-

лагающих изменение угла обзора (сектора ответственности), у агентов с всенаправленным РБ такое изменение реализуется в программной части, указанием сектора сбора и обработки зрительных данных (см. рис. 11).

За счет оптимального расположения агентов на местности обеспечивается совместный сбор визуальной информации в целях построения общей информационной среды, благодаря которой распределенная СТЗ сможет эффективно принимать решения даже в динамически изменяющихся условиях.

Описанная распределенная система технического зрения контроля пространства позволяет решать большой круг задач информационного обеспечения отдельных РТК и их группировок. Возможными сферами применения подобных систем являются: информационное обеспечение средств противодействия беспилотным летательным аппаратам, охрана объектов, поиск объектов и людей, экологический мониторинг.

Заключение. В статье описан пример распределенной системы технического зрения контроля пространства, предназначенной для информационного обеспечения РТК с повышенной степенью автономности. Ключевым звеном системы является агент – унифицированный информационный модуль, оперативно перестраиваемый на различные задачи, решаемые в масштабе реального времени (до 15-20 раз в секунду).

На описанном этапе исследований значительная часть подготовительных операций к выбору мест расположения агентов распределенной СТЗ выполняется в ручном режиме (подготовка картографической информации, выдача заданий и реализация перемещений подвижных платформ с агентами, взаимодействие с оборудованием для воздействия на обнаруженные/распознанные объекты интереса. Эти работы активно автоматизируются. Все ключевые компоненты уже опробованы, стоит задача комплексирования всех средств автоматизации и проведение экспериментов с подвижными платформами с повышенной степенью автономности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bai Z., Wu G., Barth M. J., Liu Y., Sisbot E. A., Oguchi K., Huang Z. A Survey and Framework of Cooperative Perception: From Heterogeneous Singleton to Hierarchical Cooperation // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2024. – Vol. 25, No. 11. – P. 15191-15209. – DOI: 10.1109/TITS.2024.3436012.
2. Zimmer W., Wardana G.A., Sritharan S., Zhou X., Song R., Knoll A.C. TUMTraf V2X Cooperative Perception Dataset // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2024. – P. 22668-22677. – URL: https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2024/html/Zimmer_TUMTraf_V2X_Cooperative_Perception_Dataset_CVPR_2024_paper.html (дата обращения: 04.02.2026).
3. Chen W., Chi W., Ji S., Ye H., Liu J., Jia Y., Yu J., Cheng J. A survey of autonomous robots and multi-robot navigation: Perception, planning and collaboration // Biomimetic Intelligence and Robotics. – 2025. – Vol. 5. – Article 100203. – DOI: 10.1016/j.birob.2024.100203.
4. Liu P., Bi Y., Wang C., Jiang X. A Distributed Multi-Robot Collaborative SLAM Method Based on Air-Ground Cross-Domain Cooperation // Drones. – 2025. – Vol. 9, No. 7. – Article 504. – DOI: 10.3390/drones9070504.
5. Ruan T., et al. A framework for semantics-based situational awareness during mobile robot deployments // Frontiers in Robotics and AI. – 2025. – Vol. 12. – Article 1694123. – DOI: 10.3389/frobt.2025.1694123.
6. Zhou P., et al. Designing Multi-Robot Ground Video Sensemaking with Public Safety Professionals. – 2026. – arXiv:2602.08882. – DOI: 10.48550/arXiv.2602.08882. – URL: <https://arxiv.org/abs/2602.08882> (дата обращения: 04.02.2026).
7. He Y., Huang Y., Chen G., Lu L., Pei B., Xu J., Lu T., Sato Y. Bridging Perspectives: A Survey on Cross-view Collaborative Intelligence with Egocentric-Exocentric Vision // International Journal of Computer Vision. – 2026. – Vol. 134. – DOI: 10.1007/s11263-025-02608-y.
8. Zhang S., Li Z., Xu S., Yin Y. A Survey on Multi-Robot Collaboration Systems: Architectures, Performances, and Applications: TechRxiv. – 2025. – DOI: 10.36227/techrxiv.176045766.60277537/v1. – URL: https://www.techrxiv.org/users/968140/articles/1339550/master/file/data/Multi_Robot_Systems_Survey_2025/Multi_Robot_Systems_Survey_2025.pdf (дата обращения: 04.02.2026).
9. Epsilon8854. awesome-Collaborative-SLAM (GitHub repository). – URL: <https://github.com/Epsilon8854/awesome-Collaborative-SLAM> (дата обращения: 04.02.2026).
10. Li D. Active-SLAM: awesome-Active-SLAM (GitHub repository). – URL: <https://github.com/DoongLi/awesome-Active-SLAM> (дата обращения: 02.03.2026).
11. Богуславский 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.

12. Соколов С.М., Богуславский А.А. Ключевая роль программного обеспечения в создании РТК с повышенной степенью автономности и требования к нему // Сб. трудов конференции в рамках Международного военно-технического форума «Армия-2022», 16-21 августа 2022 г., г. Кубинка.
13. Dübel S., Schumann H. Visualization of features in 3D terrain // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2017. – Vol. 6, No. 11. – Art. 357.
14. Носков В.П., Гойдин О.П., Вазаев А.В. Совместная видеонавигация роботов воздушного и наземного применения // XVIII Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2025): Матер. мультikonференции (Тула, 15 сентября – 20 сентября 2025 г.): в 4 т. Т. 1. Робототехника и мехатроника (РиМ-2025). – Тула: Изд-во ТулГУ, 2025. – С. 238-241.
15. Galatola M., Salza D., Rossi C. Risk-Aware Optimal Camera Placement for Forest Fire Detection and Monitoring // Optimization, Learning Algorithms and Applications: Proceedings of the 5th International Conference, OL2A 2025, Sesti Levante, Italy, April 28-30, 2025. Part I. – Cham: Springer, 2026. – P. 127-143.
16. Murray A.T., et al. Coverage optimization to support security monitoring // Computers, Environment and Urban Systems. – 2007. – No. 31. – P. 133-147.
17. Kaushik A., Indu S., Gupta D. A Grey Wolf Optimization Based Algorithm for Optimum Camera Placement // Wireless Personal Communications. – 2019. – Vol. 105. – P. 1143-1167.
18. Wang X., Zhang H., Gu H. Solving optimal camera placement problems in IoT using LH-RPSO // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 40881-40891.
19. Старцев Д.Ю., Логинов И.В., Родительский О.А. Численный метод расчета оптимального размещения датчиков на местности при ограничении пропускной способности // Экономика. Информатика. – 2023. – Т. 50, № 3. – С. 633-644.
20. Li X., Lin Y., Du Z., Lin M., Wu C. Intelligent multi-robot collaborative transport system // Urban Life-line. – 2024. – Vol. 2, No. 1. – Article 16.

REFERENCES

1. Bai Z., Wu G., Barth M. J., Liu Y., Sisbot E. A., Oguchi K., Huang Z. A Survey and Framework of Cooperative Perception: From Heterogeneous Singleton to Hierarchical Cooperation, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, Vol. 25, No. 11, pp. 15191-15209. DOI: 10.1109/TITS.2024.3436012.
2. Zimmer W., Wardana G.A., Sritharan S., Zhou X., Song R., Knoll A.C. TUMTraF V2X Cooperative Perception Dataset, *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2024, pp. 22668-22677. Available at: https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2024/html/Zimmer_TUMTraF_V2X_Cooperative_Perception_Dataset_CVPR_2024_paper.html (accessed 04 February 2026).
3. Chen W., Chi W., Ji S., Ye H., Liu J., Jia Y., Yu J., Cheng J. A survey of autonomous robots and multi-robot navigation: Perception, planning and collaboration, *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 2025, Vol. 5, Article 100203. DOI: 10.1016/j.birob.2024.100203.
4. Liu P., Bi Y., Wang C., Jiang X. A Distributed Multi-Robot Collaborative SLAM Method Based on Air-Ground Cross-Domain Cooperation, *Drones*, 2025, Vol. 9, No. 7, Article 504. DOI: 10.3390/drones9070504.
5. Ruan T., et al. A framework for semantics-based situational awareness during mobile robot deployments, *Frontiers in Robotics and AI*, 2025, Vol. 12, Article 1694123. DOI: 10.3389/frobt.2025.1694123.
6. Zhou P., et al. Designing Multi-Robot Ground Video Sensemaking with Public Safety Professionals, 2026. arXiv:2602.08882. DOI: 10.48550/arXiv.2602.08882. Available at: <https://arxiv.org/abs/2602.08882> (accessed 04 February 2026).
7. He Y., Huang Y., Chen G., Lu L., Pei B., Xu J., Lu T., Sato Y. Bridging Perspectives: A Survey on Cross-view Collaborative Intelligence with Egocentric-Exocentric Vision, *International Journal of Computer Vision*, 2026, Vol. 134. DOI: 10.1007/s11263-025-02608-y.
8. Zhang S., Li Z., Xu S., Yin Y. A Survey on Multi-Robot Collaboration Systems: Architectures, Performances, and Applications: TechRxiv, 2025. DOI: 10.36227/techrxiv.176045766.60277537/v1. Available at: https://www.techrxiv.org/users/968140/articles/1339550/master/file/data/Multi_Robot_Systems_Survey_2025/Multi_Robot_Systems_Survey_2025.pdf (accessed 04 February 2026).
9. Epsilon8854. awesome-Collaborative-SLAM (GitHub repository). Available at: <https://github.com/Epsilon8854/awesome-Collaborative-SLAM> (дата обращения: 04.02.2026).
10. Li D. Active-SLAM: awesome-Active-SLAM (GitHub repository). Available at: <https://github.com/DoongLi/awesome-Active-SLAM> (accessed 02 March 2026).
11. Boguslavskiy A.A., Sokolov S.M. Tekhnologiya izgotovleniya programmnogo obespecheniya STZ avtonomnykh RTK [Technology of software development for vision systems of autonomous robotic systems], *Tr. 34-y Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Ekstremal'naya robototekhnika», 23-24 noyabrya 2023* [Proceedings of the 34th International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics", November 23-24, 2023]. Saint Petersburg: TSNII RTK, 2023, pp. 27-35.

12. Sokolov S.M., Boguslavskiy A.A. Klyuchevaya rol' programmnoy obespecheniya v sozdaniy RTK s povyshennoy stepen'yu avtonomnosti i trebovaniya k nemu [The Key Role of Software in the Development of Robotic Systems with a High Degree of Autonomy and the Requirements for It], *Sb. trudov konferentsii v ramkakh Mezhdunarodnogo voenno-tehnicheskogo foruma «Armiya-2022», 16-21 avgusta 2022 g. g. Kubinka* [Proceedings of the Conference within the International Military-Technical Forum "Army-2022", August 16-21, 2022, Kubinka].
13. Dübel S., Schumann H. Visualization of features in 3D terrain, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, Vol. 6, No. 11, Art. 357.
14. Noskov V.P., Goydin O.P., Vazaev A.V. Sovmestnaya videonavigatsiya robotov vozduhnogo i na-zemnogo primeneniya [Cooperative video navigation of aerial and ground robots] *XVIII Vserossiyskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya (MKPU-2025): Mater. mul'tikonferentsii (Tula, 15 sentyabrya – 20 sentyabrya 2025 g.): v 4 t. T. 1 Robototekhnika i mekhatronika (RiM-2025)* [XVIII All-Russian Multiconference on Control Problems (MKPU-2025): Conference Proceedings (Tula, September 15–20, 2025): in 4 vols. Vol. 1. Robotics and Mechatronics (RiM-2025)]. Tula: Izd-vo TulGU, 2025, pp. 238-241.
15. Galatola M., Salza D., Rossi C. Risk-Aware Optimal Camera Placement for Forest Fire Detection and Monitoring, *Optimization, Learning Algorithms and Applications: Proceedings of the 5th International Conference, OL2A 2025, Sesti Levante, Italy, April 28-30, 2025. Part I*. Cham: Springer, 2026, pp. 127-143.
16. Murray A.T., et al. Coverage optimization to support security monitoring, *Computers, Environment and Urban Systems*, 2007, No. 31, pp. 133-147.
17. Kaushik A., Indu S., Gupta D. A Grey Wolf Optimization Based Algorithm for Optimum Camera Placement, *Wireless Personal Communications*, 2019, Vol. 105, pp. 1143-1167.
18. Wang X., Zhang H., Gu H. Solving optimal camera placement problems in IoT using LH-RPSO, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 40881-40891.
19. Startsev D.Yu., Loginov I.V., Roditel'skiy O.A. Chislenny metod rascheta optimal'nogo razmeshcheniya datchikov na mestnosti pri ogranichenii propusknoy sposobnosti [Numerical method for optimal sensor placement under bandwidth constraints], *Ekonomika. Informatika* [Economics. Informatics], 2023, Vol. 50, No. 3, pp. 633-644.
20. Li X., Lin Y., Du Z., Lin M., Wu C. Intelligent multi-robot collaborative transport system, *Urban Life-line*, 2024, Vol. 2, No. 1, Article 16.

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.

Бугеря Александр Борисович – Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук; e-mail: shurabug@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: 84992207994; к.ф.-м.н.; с.н.с.

Ильенков Максим Александрович – Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук; e-mail: m.ilyenkov@gmail.com; г. Москва, Россия; тел.: 84992207994; аспирант.

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.

Bugerya Alexandr Borisovich – Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences; e-mail: shurabug@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +74992207994; cand. of math. and physics. sc.; senior researcher.

Ilienkov Maksim Alexandrovich – Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences; e-mail: m.ilyenkov@gmail.com; Moscow, Russia; phone: +74992207994; postgraduate student.

А.А. Кочкаров, А.К. Куликов, В.М. Мацакова

УНИВЕРСАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАМКНУТЫМИ АГРОПРОИЗВОДСТВАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ИИ

Актуальность исследования обусловлена противоречием между необходимостью наращивания производства продовольствия в условиях урбанизации и фрагментарностью существующих высокотехнологичных решений (гидропоники, аэропоники, IoT), которые внедряются изолированно, без единой методологии управления. Отсутствие унифицированных подходов к сбору данных и адаптивному контролю параметров среды ограничивает масштабирование вертикальных ферм. Цель работы – разработка и теоретическое обоснование архитектуры универсальной модели адаптивного управления замкнутыми агропроизводствами, интегрирующей различные методы культивации на базе алгоритмов машинного обучения. Методология базируется на систематическом анализе научных публикаций и экспериментальных данных по применению встраиваемых устройств и алгоритмов машинного обучения в гидропонных, аэропонных и грунтовых вертикальных теплицах. На основе синтеза данных построены параметрические матрицы для унификации технологических процессов. Основные результаты включают разработку структурной схемы универсальной модели, обеспечивающей интеграцию разнородных систем в единую платформу с возможностью непрерывного мониторинга и предиктивной аналитики. Обоснован минимально необходимый комплект датчиков: pH, ЕС, температуры, влажности, CO₂, PAR, давления и расхода питательного раствора. Предложенная архитектура позволяет динамически переключать режимы гидропоники, аэропоники и закрытого грунта в рамках одного фитотрона. Выводы и значимость работы заключаются в создании основы для проектирования масштабируемых вертикальных ферм с прогнозируемыми показателями рентабельности и ресурсоэффективности, обеспечивая непрерывное дообучение алгоритмов ИИ для предиктивного управления микроклиматом и ранней диагностики заболеваний растений в городских условиях.

Вертикальное фермерство; гидропоника; аэропоника; системы закрытого грунта; искусственный интеллект; автоматизация агропроизводства; интернет вещей (IoT); машинное обучение (ML); урожайность; энергоэффективность; датчики мониторинга.

A.A. Kochkarov, A.K. Kulikov, V.M. Matsakova

A UNIVERSAL MODEL OF ADAPTIVE MANAGEMENT OF CLOSED AGRICULTURAL PRODUCTION USING AI TECHNOLOGIES

The relevance of this research stems from the contradiction between the need to increase food production in an urbanized environment and the fragmentation of existing high-tech solutions (hydroponics, aeroponics, IoT), which are being implemented in isolation, without a unified management methodology. The lack of unified approaches to data collection and adaptive control of environmental parameters limits the scalability of vertical farms. The goal of this research is to develop and theoretically substantiate the architecture of a universal adaptive management model for closed-loop agricultural production systems, integrating various cultivation methods based on machine learning algorithms. The methodology is based on a systematic analysis of scientific publications and experimental data on the use of embedded devices and machine learning algorithms in hydroponic, aeroponic, and soil-based vertical greenhouses. Based on this data synthesis, parametric matrices were constructed to standardize technological processes. The main results include the development of a structural diagram of a universal model that enables the integration of disparate systems into a single platform with the ability to continuously monitor and perform predictive analytics. The minimum required sensor set is substantiated: pH, EC, temperature, humidity, CO₂, PAR, pressure, and nutrient solution flow. The proposed architecture enables dynamic switching between hydroponic, aeroponic, and indoor modes within a single phytotron. The conclusions and significance of this work lie in creating a foundation for designing scalable vertical farms with predictable profitability and resource efficiency indicators, while enabling continuous further training of AI algorithms for predictive microclimate management and early plant disease detection in urban environments.

Vertical farming; hydroponics; aeroponics; indoor soil systems; artificial intelligence; automation of agricultural production; Internet of Things (IoT); machine learning (ML); yield; energy efficiency; monitoring sensors.

Введение. Современное вертикальное фермерство сталкивается с фундаментальной проблемой: существующие высокотехнологичные методы культивации (гидропоника, аэропоника, закрытый грунт) развиваются изолированно, каждый со своей системой управления и набором датчиков. Это приводит к отсутствию унифицированных подходов к сбору данных, адаптивному контролю параметров среды и, как следствие, к низкой экономической устойчивости и затруднённому масштабированию таких производств [1]. Мировой рынок вертикальных ферм оценивается в 8,3–8,7 млрд долларов, а российский – в 55–65 млн долларов с ежегодным ростом 25% [2], однако фрагментарность решений сдерживает их широкое внедрение.

Современные исследования демонстрируют, что интеграция встраиваемых устройств и алгоритмов машинного обучения позволяет значительно повысить эффективность управления параметрами выращивания [3–5]. Использование микроконтроллеров ESP32 и Raspberry Pi обеспечивает энергоэффективный сбор данных и передачу их в облачные платформы, такие как Blynk и ThingsBoard, что даёт возможность удалённого мониторинга и автоматизации [4, 6]. В гидропонных и аэропонных системах ключевым фактором успеха является точный контроль состава питательного раствора (pH, EC, TDS) и параметров микроклимата [7, 8]; для аэроponики дополнительно требуется управление дисперсностью аэрозоля (20–100 мкм) [9, 10]. Компьютерное зрение и методы машинного обучения (Random Forest, SVR) уже применяются для диагностики заболеваний растений по цвету и текстуре листьев, а также для прогнозирования урожайности [5, 11, 12].

Несмотря на очевидные преимущества встраиваемых систем и машинного обучения, остаются открытыми вопросы совместимости устройств, безопасности данных и отсутствия единых протоколов [1]. Анализ доступных коммерческих решений и патентных разработок (RU196013U1, RU199457U1) показывает, что в настоящее время не существует универсальной климатической камеры, позволяющей переключать режимы гидроponики, аэроponики и закрытого грунта без изменения базовой конструкции установки.

Цель настоящей работы – разработка и теоретическое обоснование архитектуры универсальной модели адаптивного управления замкнутыми агропроизводствами, интегрирующей различные методы культивации на основе алгоритмов машинного обучения.

Научно-техническая задача. Разработать и обосновать архитектуру программно-аппаратного комплекса (гибридного фитотрона), реализующего универсальную модель адаптивного управления замкнутыми агропроизводствами. Комплекс должен обеспечивать возможность динамического переключения между гидропонным, аэропонным и грунтовым (субстратным) способами выращивания в рамках одной установки без изменения её базовой конструкции. Для этого необходимо:

1. Провести сравнительный анализ параметров микроклимата и питательной среды, характерных для каждого метода культивации, и определить минимально необходимый набор сенсоров;
2. Разработать структурную схему унифицированной системы сбора данных и адаптивного управления, интегрирующую разнородные исполнительные устройства. Решение поставленной задачи позволит создать масштабируемую платформу для автоматизированного агропроизводства с повышенной эффективностью использования ресурсов и адаптацией к различным культурам и условиям.

Материалы и методы. Будет проведен сравнительный анализ современных методов автоматизации, таких способов выращивания растений в вертикальных теплицах как гидропоника, аэропоника и закрытый грунт. Критериями сравнения являются: технологическая сложность, энергоёмкость и урожайность.

Гидропонные системы. Гидропонные системы рис. 1. представляют собой сложную инфраструктуру, включающую множество взаимосвязанных компонентов, таких как насосы, трубы, субстраты и программное обеспечение для автоматизации. Каждый из этих элементов играет ключевую роль в обеспечении точного контроля над условиями роста растений, что делает гидроponику особенно подходящей для городских условий и вертикального земледелия [7]. Современные технологии позволяют автоматизировать управление этими процессами через использование микроконтроллеров и встраиваемых систем, таких как датчики pH, электропроводности (EC) и температуры [6].

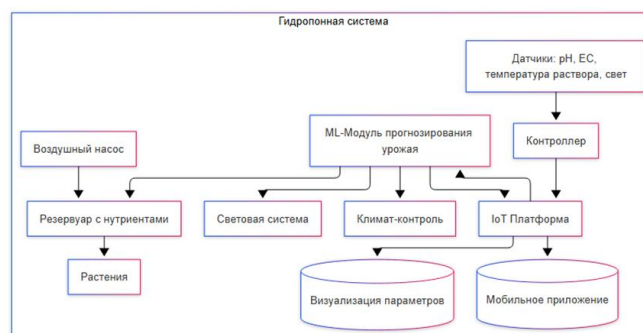


Рис. 1. Структурная схема гидропонной системы

Например, мобильные приложения могут регулировать работу насосов и дозирующих устройств на основе данных, полученных от датчиков, что значительно снижает зависимость от человеческого фактора. Однако внедрение таких технологий требует значительных начальных инвестиций и технической экспертизы, что увеличивает общую сложность установки и эксплуатации гидропонных систем по сравнению с традиционными методами выращивания [13]. Сравнительный анализ показывает, что гидропонные системы потребляют на 90% меньше воды по сравнению с традиционным земледелием благодаря рециркуляции и минимизации потерь [14]. Тем не менее, такие системы остаются энергоемкими, особенно когда используются искусственное освещение и климат-контроль. Важно отметить, что автоматизация процессов управления питательными веществами и мониторинг параметров, таких как pH и ЕС, может значительно снизить риск ошибок, связанных с человеческим фактором. Однако обслуживание и калибровка датчиков остаются критически важными задачами, поскольку любые сбои могут привести к серьезным проблемам, таким как дисбаланс питательных веществ или заражение корней [6]. Таким образом, хотя гидропонные системы предлагают значительные экологические и экономические преимущества, их технологическая сложность остается существенным препятствием для широкого распространения, особенно среди мелкомасштабных фермеров. Для преодоления этих барьеров необходимы дальнейшие исследования в области снижения энергопотребления и разработки более доступных решений для автоматизации.

Аэропонные системы. Аэропонные системы представляют собой инновационный подход к выращиванию растений, при котором корни подвешиваются в воздухе и орошаются питательным раствором через распылители. В основе их эффективности лежит точный контроль за условиями окружающей среды, что обеспечивает высокую урожайность и снижение потребления воды [9].

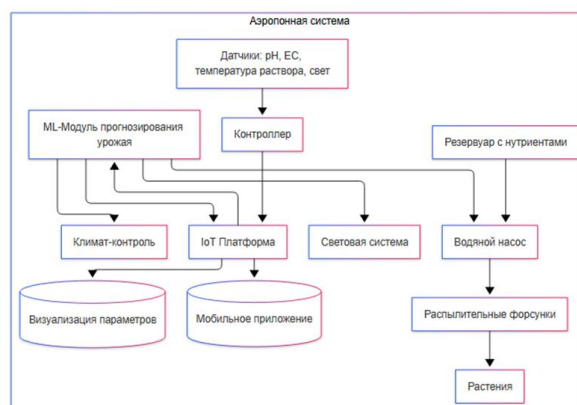


Рис. 2. Структурная схема аэропонной системы

Однако для успешной реализации таких систем требуется сложное оборудование, регулярное техническое обслуживание и значительные начальные инвестиции. Для работы аэропонных систем необходим ряд специализированных устройств, включая распылители, насосы высокого давления, датчики контроля параметров окружающей среды и системы автоматизации. Системы мониторинга и управления также являются неотъемлемой частью аэропоники. Современные технологии, включая IoT, нейронные сети и сенсорные системы, позволяют контролировать такие параметры, как уровень pH, температура, влажность и концентрация питательных веществ. Например, использование компьютерных технологий позволяет своевременно обнаруживать механические и биологические проблемы, предотвращая повреждение растений [9]. Тем не менее, зависимость от электричества и высокая стоимость оборудования остаются значительными препятствиями для широкого внедрения аэропоники, особенно в условиях ограниченного бюджета.

Системы закрытого грунта. Автоматизация в системах закрытого грунта представляет собой сложный процесс, объединяющий передовые технологии управления климатом, орошением, питательными средами и освещением на рис. 3. В последние годы значительное внимание уделяется интеграции искусственного интеллекта (ИИ), интернета вещей (IoT) и роботизированных решений для повышения урожайности и оптимизации использования ресурсов [3].

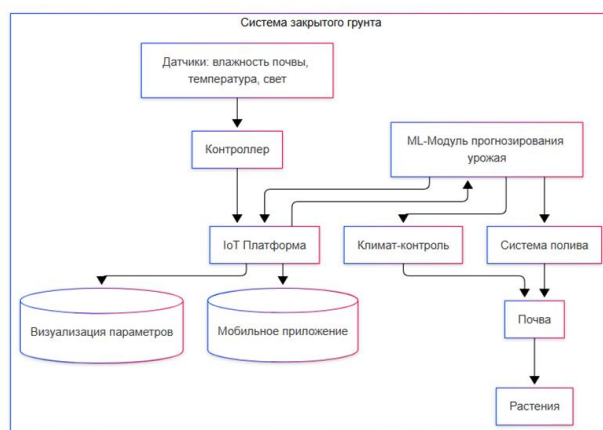


Рис. 3. Структурная схема систем закрытого грунта

Эти технологии позволяют создавать высокопроизводительные системы, способные работать в условиях ограниченного пространства и изменчивых внешних условий, что особенно важно для мелкомасштабных ферм и городского сельского хозяйства. Одним из ключевых преимуществ автоматизации является снижение зависимости от ручного труда. Например, компания Zordi разработала полностью автоматизированные тепличные системы, которые уменьшают потребность в человеческом участии на 80% [15]. Их решения включают точный контроль параметров микроклимата, автоматизированное орошение и доставку питательных веществ, а также использование ИИ для анализа данных в реальном времени. В развитых странах, таких как Нидерланды и США, автоматизация широко применяется в крупных коммерческих теплицах. Например, проект Autonomous Greenhouses Challenge демонстрирует практическую применимость ИИ-технологий в реальных условиях [3].

Таким образом, по результатам анализа были выявлены плюсы и минусы различных подходов к вегетации. На сегодняшний день, есть общая концепция контролируемого земледелия, в англоязычной литературе концепция называется CEA (Controlled Environment Agriculture). Концепция CEA имеет следующие принципы:

1. Принцип оптимизации факторов роста растений. Создание и поддержание идеальных (заданных) значений для каждого фактора роста в течение всего жизненного цикла растения.

2. Принцип изоляции от внешней среды. Создание физического барьера, минимизирующего влияние неконтролируемых внешних факторов (погода, вредители, болезни, загрязнения).

3. Принцип ресурсной эффективности и устойчивости. Максимизация продуктивности на единицу потребляемых ресурсов (вода, удобрения, площадь).

4. Принцип автоматизации и управления на основе данных. Использование систем сбора данных (сенсоры) и автоматического управления (АСУ ТП) для минимизации человеческого фактора и принятия оптимальных решений.

Кроме этого, систематизированы результаты исследования климатических камер для выращивания растений доступных к приобретению.

Таблица 1

Климатические камеры для выращивания растений

Модель	Тип / Назначение	Основные характеристики (включая освещение)
Фитотрон ЛиА-1	Климатическая камера (фитотрон)	Температура (день): +10...+30°C; Температура (ночь): +5...+25°C; Точность: $\pm 2^\circ\text{C}$; Габариты (ШхГхВ): 800х725х2050 мм; Вес: до 140 кг; Питание: 220В, до 1,2 кВт; Освещение: 2 светодиодные панели.
Фитотрон ЛиА-2	Климатическая камера (фитотрон)	Температура (день): +10...+30°C; Температура (ночь): +5...+25°C; Точность: $\pm 2^\circ\text{C}$; Габариты (ШхГхВ): 1600х725х2050 мм; Вес: до 220 кг; Питание: 220В, до 1,2 кВт; Освещение: 4 светодиодные панели.
КК 500 FIT P	Климатическая камера с фитотронной системой	Объем: 470 л (общий), 365 л (полезный); Температура: 0...+60°C (со светом +10...+50°C); Габариты (ШхГхВ): 65х199х104 см; Мощность: 2140 Вт (ном.); Напряжение: 230 В, 50 Гц; Контроллер: Smart PRO; Освещение: световая панель с лампами дневного света (спектр для растений), есть разъёмы для доп. панелей.
Климатические камеры (Фитотрон) [модель не указана]	Климатическая камера (фитотрон)	Объем: 250 л; Температура: -5...+50°C; Материал камеры: нержавеющая сталь; Особенности: контроль влажности грунта, многозонный мониторинг, 4 съёмные полки, двойные двери; Освещение: светодиодное, с изменяемым спектром и интенсивностью, многозонное.
FitoClima 600-1200HP LED	Камера роста растений	На странице каталога подробные технические характеристики отсутствуют. Освещение: светодиоды, спектр AP67 (Valoya) для роста и цветения.
FitoClima Walk-in (PL/PLH)	Проходная камера / комната (несколько уровней)	Температура (свет вкл): +5...+45°C; Температура (свет выкл): -5...+45°C; Влажность (свет вкл/выкл): 40-80% / 40-90%; Точность темп./влажн.: $\pm 0,5^\circ\text{C}$ / $\pm 1\%$; Внутренняя площадь полок: от 4,5 до 18 м²; Расход воздуха: горизонтальный ламинарный поток, 0,3-1 м/с; Питание: 3-фазное, 400В; Освещение: от флуоресцентных до светодиодов (до 600 мкмоль/м²/с), регулировка 10-100%.

VeFarm Clima Pro	Климатическая камера (фитотрон) для образования	Особенности: автоматический полив, вентиляция, сигналы тревоги, построение графиков; Освещение: независимое освещение на трёх полках.
АгроЛаб МОДУЛЬ	Лаборатория агробиотехнологий	Габариты модуля управления: 695х1315х655 мм; Габариты модуля выращивания: 1900х1800х655 мм; Материалы: нержавеющая сталь, алюминий; Питание: 220 В; Особенности: 4 климатические зоны, поддержка до 40 экспериментов, 10 линий полива, охлаждение (-5°C), видеонаблюдение; Освещение: полноспектральный светильник "Искусственное солнце".
ECODOX ED	Агролаборатория (учебная гидропонная система)	Габариты (ДхШхВ): 650х600х410 мм; Вес: 15 кг; Питание: 220 В; Потребление: 80 Вт; Особенности: программирование (Arduino), изучение гидропоники; Освещение: LED-светильники.
Климатокамера ФИТОТРОН (Россия)	Климатическая камера (фитотрон)	Температура: до +60°C; Точность: $\pm 1^\circ\text{C}$; Неравномерность: $\leq 2,5^\circ\text{C}$; Освещенность: 0–10 000 Люкс (ступенчатая); Питание: 220 В, 500 Вт; Управление: ЖК-дисплей, до 3 программ.
Fitoclima 12000 / 600 (Aralab)	Проходные камеры для выращивания растений	Объем: 12 000 л и 6 000 л; Температура: 0...+45°C; Влажность: 40–90%; Освещение: 2 уровня освещения; Особенности: капельное орошение с дозированием растворов.
Fitotron SGC1700	Камера роста растений	Объем: 1658 л; Внутренние размеры (ШхГхВ): 1400х800х1480 мм; Температура (свет вкл): +7...+40°C; Температура (свет выкл): 0...+40°C; Влажность: 25–95%; Освещение: 20 люминесцентных ламп (диммируемые) + 8 ламп накаливания, макс. 900 мкмоль/м ² /с; Питание: 380-440 В, 3 фазы.
Автоматизированная система (фитотрон) на базе ОВЕН (Россия)	Система для селекции и исследований	Температура: 0...+50°C; Влажность: 30–90%; Освещение: регулируемое, с соотношением синего/красного спектра; Автоматизация: воздухообмен, полив, сценарии "весна-лето-осень".
Fitotron HGC 1514 LED	Модульная климатическая камера	Площадь культивации: 1,5 м ² ; Высота роста: до 1,6 м; Температура: -10...+40°C (с имитацией заморозков); Освещение: диммируемые светодиоды с симуляцией спектра дневного света, до 1000 мкмоль/м ² /с; Управление: сенсорные панели + ПО SIMPATI для удаленного контроля.

Также, были систематизированы данные по климатическим камерам способные поддерживать выращивание растений на основе методов аэропоники и гидропоники. В рамках открытых источников информации сети Интернет не было найдено коммерчески доступного лабораторного оборудования. В российских патентных разработках последних лет представлены интересные решения, совмещающие фитотроны с гидро- и аэропоники. Например, патент RU196013U1 описывает специализированный аэропонный фитотрон с герметичными камерами для корней, системой охлаждения и обеззараживания

питательного раствора, а также тензометрическими датчиками для непрерывного мониторинга массы растений в ходе экспериментов. Другая полезная модель, RU199457U1, предлагает универсальный фитотрон-трансформер, который благодаря особой конструкции лотков-ярусов может быть обратимо превращен из аэропонного в гидропонный режим простым их переворачиванием; устройство также оснащено системой регистрации динамики роста для сравнительного анализа. Кроме того, известен бытовой фитотрон RU49420U1, предназначенный для гидропонного выращивания и содержащий вращающуюся стойку с лотками для равномерного освещения растений и даже устройство для создания радуги

Таким образом, коммерчески доступной разработки, которая бы позволяла осуществлять всесторонний контроль над растением вне зависимости от способа выращивания на текущий момент времени нет

Результаты. Сравнение сложности настройки и поддержания систем закрытого грунта с другими методами выращивания, такими как гидропоника и аэропоника, показывает, что каждая из них имеет свои особенности. Гидропонные системы обеспечивают высокую урожайность благодаря возможности многократных сборов урожая круглый год [5]. Однако они требуют точного контроля над питательными растворами и уровнем pH, что увеличивает сложность их эксплуатации. Аэропоника, с другой стороны, позволяет сократить потребление воды на 95% по сравнению с традиционным земледелием, но её установка и обслуживание могут быть более затратными из-за необходимости высокотехнологичного оборудования [5]. Закрытый грунт занимает промежуточное положение, сочетая относительную простоту настройки с возможностью адаптации к различным условиям выращивания. Влияние автоматизации на повышение урожайности особенно заметно при выращивании цветов и овощей. Согласно исследованию Cornell University, доходы от использования инновационных технологий в закрытом грунте могут превышать доходы традиционного сельского хозяйства в 4000 раз [5]. Примером успешной реализации является компания Gotham Greens, чьи теплицы на крышах производят 90 тыс. кг. овощей ежегодно, заменяя 400 тыс. кв.м. обычных полей. Автоматизация позволяет минимизировать воздействие на окружающую среду за счет снижения потребления воды и удобрений. Например, системы капельного орошения, управляемые датчиками влажности почвы, могут сократить потребление воды на 50%. Несмотря на значительные преимущества, автоматизация в системах закрытого грунта сталкивается с рядом вызовов. Одной из основных проблем является обеспечение безопасности данных IoT-устройств, так как существует риск несанкционированного доступа и кибератак. Для защиты систем предложены многоуровневые протоколы безопасности, включающие шифрование данных и использование блокчейн-технологий. Кроме того, необходимы дальнейшие исследования для совершенствования технологий автоматизации и повышения их экологической устойчивости [3, 16, 17]. Таким образом, автоматизация систем закрытого грунта представляет собой мощный инструмент для повышения урожайности и устойчивости сельского хозяйства [18]. Однако её успешное внедрение требует учета региональных особенностей, экономических факторов и технологических ограничений.

За счет динамичного развития элементной базы вычислительных систем и их общей тенденции к миниатюризации, это оказывает катализирующую роль в области объединения различных подходов выращивания в рамках единого контура универсальной модели адаптивного управления замкнутыми агропроизводствами с целью создания универсальной климатической камеры со сменяемыми видами выращивания растений.

На текущей стадии развития за счет анализа различных источников можно выделить основные параметры анализа различных видов выращивания культур табл. 2 и собрать в единую структурную схему рис. 4.

Концептуальная архитектура системы рис. 4, предназначенная для унификации управления тремя различными методами культивации: гидропоникой, аэропоникой и закрытым грунтом. Схема имеет иерархическое строение и состоит из следующих ключевых уровней и блоков: Уровень объектов управления и сенсорики. В схеме расположены три блока, соответствующие различным методам выращивания: Гидропоника[19], Закрытый

грунт [20] и Аэропоника [21]. Внутри каждого блока подразумевается наличие физических объектов: растений, резервуаров с питательным раствором, субстрата, климатической камеры. Данные от всех трех типов систем стекаются в единый центр для первичной обработки. Таким образом, первый уровень решает задачу гетерогенного сбора данных.

Таблица 2

Параметры анализа различных видов выращивания культур

	Гидропоника	Аэропоника	Закрытый грунт
Температура воздуха	☐	☐	☐
Влажность воздуха	☐	☐	☐
Уровень CO ₂	☐	☐	☐
Интенсивность света (PPFD)	☐	☐	☐
pH раствора / почвы	☐	☐	☐
ЕС (электропроводность)	☐	☐	☐
TDS (общие растворённые соли)	☐	☐	—
Температура раствора	☐	☐	—
Уровень питательного раствора	☐	☐	—
Частота и время атомизации	—	☐	—
Влажность почвы	—	—	☐
Температура почвы	—	—	☐
Структура и состав почвы	—	—	☐
Цвет и состояние листьев	☐	☐	☐
NDVI / индекс растительности	☐	☐	☐

Уровень унификации данных и первичного анализа: Центральный блок "Контроллер" играет роль агрегатора. Он принимает разнородные сигналы: От гидропоники: pH, ЕС, TDS, температура и уровень раствора; От аэропоники: все параметры гидропоники плюс критически важные частота и время атомизации, а также давление в системе; От закрытого грунта: влажность, температура и структура почвы.

Кроме того, существуют общие для всех систем параметры (температура/влажность воздуха, CO₂, освещение PAR, данные технического зрения), которые также поступают в этот блок. Блок выполняет функцию нормализации и структурирования данных, приводя их к единому формату, пригодному для анализа. Он является интерфейсом между аппаратной частью системы и программной частью системы.

Уровень обработки и принятия решений: Блок – "ML модуль". Он получает унифицированные данные из предыдущего блока. Внутри этого блока реализованы следующие функции: Предиктивная аналитика: Использование моделей (регрессия, SVR, Random Forest) для прогнозирования урожайности, скорости роста, риска заболеваний. Кластеризация и поиск паттернов: Выявление скрытых зависимостей между параметрами среды и состоянием растений для разных методов выращивания. Обучение и адаптация: Непрерывное дообучение моделей по мере накопления экспериментальных данных. Этот блок принимает решение о том, какие параметры и как необходимо скорректировать.

Уровень управления и исполнения:

Решения, принятые блоком ML, передаются на блок "Контроллер", для генерации конкретных управляющих сигналов для исполнительных устройств. Именно здесь происходит реализация принципов СЕА и специфических принципов для каждого типа выращивания. Сигналы от "Адаптивного управления" направляются обратно к трем типам систем (замыкая контур управления).

Схема подразумевает, что управление может быть как прямым, так и косвенным, влияющим на общие для всех систем параметры.

Структурная схема представленная на рис. 4. может быть реализована с использованием следующих датчиков, представленных в табл. 3.

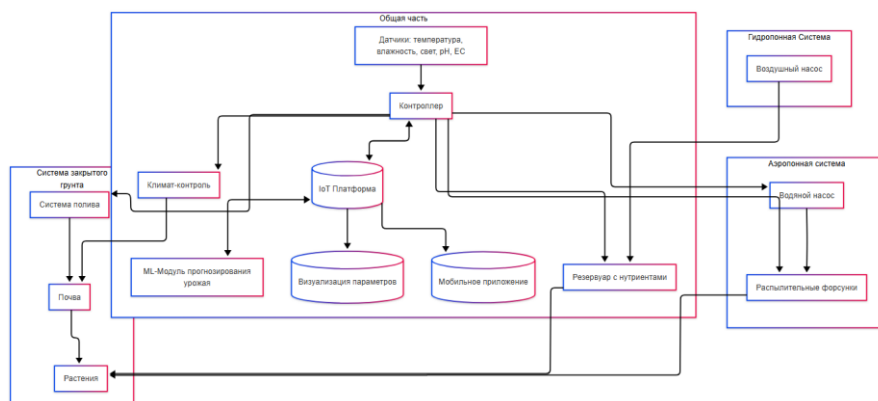


Рис. 4. Структурная схема универсальной модели адаптивного управления замкнутыми агропроизводствами

Таблица 3

Типы датчиков для унифицированной системы выращивания растений

Параметр	Датчик	Описание
Температура воздуха/ почвы	DS18B20	Цифровой температурный датчик с высокой точностью
Влажность воздуха	DHT22	Комбинированный датчик температуры и влажности
pH раствора / почвы	Atlas Scientific pH Probe или аналог YFS-201	Высокоточный цифровой датчик pH
Электропроводность (EC)	Gravity EC Sensor V2.0 или EC-5	Измеряет уровень растворенных солей
Уровень воды / раствора	Ультразвуковой датчик HC-SR04 или поплавковый датчик	Контроль уровня жидкости в резервуаре
TDS (общее количество растворённых солей)	Gravity TDS Sensor	Связан с EC, используется в воде
CO ₂	MH-Z19B	Измеряет концентрацию углекислого газа
Свет (PPFD)	PAR-сенсор Apogee MQ-500	Измерение фотосинтетического светового потока
Спектр света	TCS34725	Определение цвета и спектра освещения
Влажность почвы	FC-28 / YL-69 / емкостной датчик	Аналоговые или цифровые
Турбидность воды	SEN0189	Измеряет мутность воды
Листовая температура	MLX90614	Инфракрасный датчик без контакта
NDVI / индекс растительности	Multispectral камеры (Parrot Sequoia, MAPI)	

В рамках полученной универсальной модели важными элементами являются алгоритм обработки данных с сенсоров и датчиков и алгоритм аннотирования полученных изображений в автоматическом режиме.

Алгоритм обработки данных с сенсоров и датчиков:

1. Инициализация: настройка GPIO и интерфейсов (I²C, 1-Wire, UART, RS-485), подключение к Wi-Fi и MQTT-брокеру, загрузка уставок и допустимых диапазонов из EEPROM, сброс счётчиков ошибок датчиков.

2. Основной цикл с периодом ТТ (1–10 с):

а) Опрос аналоговых датчиков (5 отсчётов с интервалом 10 мс) и цифровых (1-Wire, I²C, UART); фиксация ошибок чтения.

б) Медианная фильтрация и экспоненциальное скользящее среднее (EMA) с коэффициентами $\alpha=0,2$ (быстрые процессы) и $\alpha=0,05$ (медленные).

в) Преобразование в физические величины: температура (°C), влажность (%), pH, ЕС (мСм/см), CO₂ (ppm), PAR (мкмоль/м²/с), уровень жидкости (см), освещённость (лк).

г) Валидация по допустимым диапазонам; при выходе за пределы счётчик ошибок инкрементируется, при превышении порога датчик маркируется неисправным и используются последние достоверные значения или резервный датчик.

д) Сравнение с установками; при отклонении за гистерезис – дискретное включение/выключение реле или ПИД-регулирование (ШИМ); фиксация состояний исполнительных устройств.

е) Формирование JSON-пакета (метка времени, значения, статусы, состояния, режим) и отправка по MQTT/HTTP; при отсутствии связи – буферизация в SPIFFS с последующей передачей.

ж) Расчёт времени выполнения шагов; при остатке – переход в режим энергосбережения до начала следующего цикла.

3. Обработка прерываний: при срабатывании датчика протечки, превышении уровня или нажатии аварийной кнопки – немедленная остановка всех исполнительных устройств, отправка экстренного уведомления оператору, запись события в энергонезависимый лог.

Алгоритм аннотирования полученных изображений в автоматическом режиме.

Инициализация: загрузка предобученной модели Grounding DINO и формирование текстового промпта с перечнем классов в формате, ожидаемом моделью.

Загрузка метаданных: чтение файла с показаниями датчиков (температура, pH, ЕС и др.), содержащего временные метки для последующей интеграции с визуальными данными.

Формирование списка изображений: сканирование директории и выделение файлов, не прошедших аннотацию.

Цикл обработки изображений:

а) чтение изображения;

б) обнаружение объектов по текстовому описанию без предварительного обучения на размеченных примерах моделью Grounding DINO с заданным промптом;

в) фильтрация детекций по порогу уверенности;

г) преобразование координат выделенных областей в абсолютные (пиксели) или нормализованные;

д) сохранение результатов в формате JSON(имя файла, временная метка, список объектов с классами, координатами).

Объединение с метаданными: сопоставление аннотаций с данными датчиков по временным меткам (ближайшая запись).

6.Формирование набора данных:

а) экспорт в стандартные форматы (COCO, JSON, YOLO);

б) разделение на обучающую, валидационную и тестовую выборки (случайным образом или по временному признаку).

7. Логирование: фиксация количества обработанных изображений, распределения классов и ошибок для последующего анализа.

Обсуждение. Гидропонные системы обеспечивают стабильную высокую урожайность благодаря экономии воды и снижению трудозатрат. Аэропонные системы предлагают максимальный рост продуктивности за счет точного контроля параметров, но требуют сложного оборудования и высокого уровня квалификации оператора. Системы закрытого грунта с использованием встраиваемых систем позволяют достичь значительно-го увеличения урожайности, однако начальные затраты и проблемы с подключением в сельской местности могут стать препятствием для внедрения. В целом, автоматизация сельского хозяйства открывает новые горизонты для повышения эффективности и устойчивости производства продуктов питания.

Сравнительный анализ гидропонных, аэропонных и систем закрытого грунта подтверждает, что каждая из них обладает уникальными преимуществами и ограничениями, которые необходимо учитывать при выборе подходящей технологии для конкретных условий производства. Гидропонные системы предлагают высокую экономическую доступность, простоту масштабирования и значительную экономию воды (до 90%), что делает их идеальным решением для начинающих фермеров и мелкомасштабных хозяйств. Однако они требуют точного контроля над параметрами питательных растворов и уровнем pH, что увеличивает сложность эксплуатации [8]. Аэропоника, несмотря на высокие начальные затраты, обеспечивает максимальную урожайность (увеличение на 45–75%) и минимальное потребление воды (на 95%). Точное управление размером капель питательного раствора и параметрами окружающей среды делает эту технологию особенно привлекательной для городских хозяйств с ограниченными ресурсами. Однако высокие операционные расходы и техническая сложность обслуживания могут стать препятствием для широкого внедрения [8]. Системы закрытого грунта с использованием встраиваемых систем и автоматизации демонстрируют значительное повышение урожайности и устойчивости производства. Например, доходы от использования инновационных технологий могут превышать доходы традиционного сельского хозяйства в 4000 раз [5]. Однако такие системы требуют значительных начальных инвестиций и зависят от доступности электричества и квалифицированной рабочей силы, что может ограничивать их внедрение в развивающихся регионах.

Необходимо отметить, что датчики необходимо дополнительно оснастить дополнительными защитными корпусами с целью обеспечения бесперебойности работы вне зависимости от типа выращивания в агропроизводстве.

Данное исследование поможет в создании универсальной модели адаптивного управления замкнутыми агропроизводствами и разработке универсального интеллектуального фитотрона

Заключение. По результатам, сравнительного анализа предлагается концепция современной системы автоматизации различных способов выращивания растений за счёт унификации системы сбора данных о состоянии растения и окружающей среды, а также постоянного дообучения режимов выращивания различных культур в различных средах и ранней детекции заболеваний растений с целью увеличения эффективности выхода полезной продукции с квадратного метра агропроизводства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ali A., Hassan S., Khan M. Application of machine learning in predictive agriculture, *arXiv preprint arXiv:2312.00030*, 2023.
2. Despommier D., Carter M., Giacomelli G.A. The Vertical Farm: Feeding the World in the 21st Century, 2024. ISBN 9781429946049. Available at: <https://books.google.ru/books?id=0DxTK0jW35sC>.
3. Chowdhury M.A., Ahmed S., Islam M., et al. Development of an IoT-based indoor hydroponic system, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, Vol. 56, No. 102079. doi: 10.1016/j.seta.2023.102079.
4. Zhang Y., Li X., Wang Z. Smart farming techniques based on IoT and machine learning, *Smart Cities and Sustainability*, 2023. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827123001191> (accessed 7 April 2025).
5. Rajendiran G., Suresh P., Mohanraj R. Future of smart farming techniques: significance of urban vertical farming systems integrated with IoT and machine learning, *ResearchGate*, 2023. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Gowtham-Rajendiran/publication/372890247_Future_of_Smart_Farming_Techniques_Significance_of_Urban_Vertical_Farming_Systems_Integrated_with_IoT_and_Machine_Learning/links/652a2e5f1a05311a23fbeb81/Future-of-Smart-Farming-Techniques-Significance-of-Urban-Vertical-Farming-Systems-Integrated-with-IoT-and-Machine-Learning.pdf (Accessed 7 April 2025).
6. Kumar S., Singh A., Gupta R. Sustainable agricultural systems with IoT and AI, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, Vol. 210, No. 107601. doi: 10.1016/j.compag.2023.107601.
7. Smith B., Johnson R., Williams T. Real-time soil monitoring using IoT, *Sensors*, 2023, Vol. 23, No. 1, pp. 451. doi: 10.3390/s23010451.
8. Omondi F., Odhiambo H., Okoye K. IoT-based water management in smart farming, *Journal of Digital Food, Energy and Water Systems*, 2023, Vol. 1, No. 1, pp. 2873. doi: 10.25603/uj.dfe.2023.2873.
9. Kim Y., Park S., Lee W. Wireless sensor networks for precision agriculture, *Sensors*, 2020, Vol. 20, No. 19, pp. 5637. doi: 10.3390/s20195637.
10. Chen H., Zhao Q., Wu Y. Comparative study of hydroponics and aeroponics under controlled conditions, *Environmental Research*, 2023, Vol. 224, No. 104895. doi: 10.1016/j.envres.2023.104895.

11. Petrov I., Smirnov A., Ivanov N. Energy-efficient IoT systems for controlled environment agriculture, *Environmental Technology & Innovation*, 2023, Vol. 25, No. 100230. doi: 10.1016/j.eti.2023.100230.
12. Al-Massri A., Al-Khatib M., Abu-Naser S. Smart irrigation systems using IoT and machine learning, *Water*, 2023, Vol. 15, No. 1, pp. 451. doi: 10.3390/w15010451.
13. Liu X., Zhang Y., Wang J. Intelligent algorithms for environmental monitoring in agriculture, *IEEE Access*, 2022, Vol. 10, pp. 7965-7975. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3197965.
14. Huang L., Zhao M., Sun Y. Machine learning applications in smart irrigation, *Agricultural Water Management*, 2023, Vol. 285, No. 108401. doi: 10.1016/j.agwat.2023.108401.
15. Rajendiran G., Prabakaran R., Balasubramanian K. Optimizing lettuce crop yield prediction in an indoor aeroponic vertical farming system using IoT-integrated machine learning regression models, *ResearchGate*, 2024. Available at: https://www.researchgate.net/profile/GowthamRajendiran/publication/381638477_Optimizing_Lettuce_Crop_Yield_Prediction_in_an_Indoor_Aeroponic_Vertical_Farming_System_Using_IoTIntegrated_Machine_Learning_Regression_Models/links/6677cd03d21e220d89c91f92/Optimizing-Lettuce-Crop-Yield-Prediction-in-an-Indoor-Aeroponic-Vertical-Farming-System-Using-IoT-Integrated-Machine-Learning-Regression-Models.pdf?__cf_chl_tk=5DSGdpFzRwfcKSP4HAmGplTjQ_InQN0dFJDPuGm2MII-1741624838-1.0.1.1-_KOfK7RxM3lwla6AlAt8r4pOrbUXgdBM_kU442SGz2I (Accessed 7 April 2025).
16. Kim J., Lee H., Park C. IoT-based monitoring and control for greenhouse environments, *Sensors*, 2022, Vol. 22, No. 15, pp. 5646. doi: 10.3390/s22155646.
17. Ivanova L., Petrova M. Prospects of IoT integration in vertical farming, *Technologies*, 2022, Vol. 10, No. 1, pp. 26. doi: 10.3390/technologies10010026.
18. Nguyen T., Tran V., Pham H. Cloud-based IoT platform for plant disease detection, *MDPI Sensors*, 2023, Vol. 23, No. 1. doi: 10.3390/s23010451.
19. Ruscio D., Marconi S., Di Benedetto M. Low-cost IoT hydroponic system for urban agriculture, *Food and Bioprocess Technology*, 2023, Vol. 138, pp. 119-130. doi: 10.1016/j.fbp.2023.01.010.
20. Tanaka K., Yamamoto S., Sato T. Urban vertical farming with smart climate control, *Springer Lecture Notes in Networks and Systems*, 2023, Vol. 615, pp. 115-125. doi: 10.1007/978-981-97-7603-0_15.
21. Patel R., Shah D., Desai N. Data-driven optimization of growing conditions in aeroponic systems, *Sustainability*, 2022, Vol. 14, No. 20, pp. 12345. doi: 10.3390/su142012345.

Кочкаров Азрет Ахматович – Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии Российской академии наук»; e-mail: akochkar@fbras.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74956603430 (доб. 499); зам. директора по инновационной работе Федерального государственного учреждения; д.т.н.; к.ф.-м.н.

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

Мацакова Валерия Максимовна – Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации; email: 233390@edu.fa.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89224401661; студентка.

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

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

Matsakova Valeria Maksimovna – Financial University under the Government of the Russian Federation; e-mail: 233390@edu.fa.ru; Moscow, Russia; phone: +79224401661; student.

Раздел II. Системы управления и моделирование

УДК 007.52:629.022:004.94

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-106-120

А.В. Васильев, И.В. Шардыко, А.Ю. Жуков

ОБЩИЕ ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ КОНСТРУКЦИИ И ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ МНОГОСТЕПЕННОГО КОЛЁСНО-ШАГАЮЩЕГО ШАССИ ЛУНОХОДА

Рассматривается задача построения шасси исследовательского лунохода, обладающего сверхвысокой проходимостью в условиях неопределённости подстилающей поверхности и рельефа местности. Прямое дистанционное и супервизорное управление современными сложными робототехническими системами в условиях недетерминированности окружающей среды накладывает повышенную нагрузку на оператора, особенно в случае применения высокопроходимых мобильных платформ, имеющих большое количество степеней подвижности требующих согласованного управления. В этом аспекте актуальной становится задача автоматизации движения такого многостепенного шасси, автоматизации тактики движения, принимаемой в тех или иных ситуациях на основе информации от датчиков. В настоящей статье предлагается концепция многостепенного колёсно-шагающего шасси (КШШ) исследовательского лунохода, включающая конструктивно-компоновочную схему шасси и способ его применения, т.е., алгоритмы движения на пересечённой местности различного типа. Предлагается методика построения алгоритмов управления и даётся краткое описание разработанных алгоритмов и компьютерных имитационных моделей КШШ для их теоретической обработки. Конечным результатом работы предполагается получение в ходе экспериментальных исследований ряда характеристик лабораторного макета шасси, проведение верификации разработанных компьютерных моделей и алгоритмов автоматического управления движением многостепенного КШШ. Выполнение этих задач позволит получить научно-технический задел в области управления движением колёсно-шагающими системами, повысить качество моделирования и проектирования луноходов. Полученные на данном этапе результаты позволяют перейти к этапу изготовления экспериментального макета и постановки физических экспериментов по исследованию КШШ с целью отработки разработанных алгоритмов и имитационных моделей. Экспериментальная проверка алгоритмов управления движением многостепенных шасси и отработка методики их построения позволит повысить уровень автономности будущих мобильных роботов, предназначенных для работы в экстремальных напланетных условиях.

Шасси; луноход; колёсное шагание; колёсно-шагающее шасси; компьютерная модель; имитационное моделирование.

A.V. Vasiliev, I.V. Shardyko, A.Y. Zhukov

DESIGN AND SIMULATING GENERAL APPROACHES OF AN ARTICULATED WHEELED-LEGGED CHASSIS OF THE LUNAR ROVER

The paper considers the problem of constructing a chassis for a research lunar rover with ultra-high traversability over uncertain terrain with soft soil. Direct remote and supervisory control of modern complex robotic systems in non-deterministic environment places an increased workload on the operator, especially in the case of high-traversability mobile platforms with a large number of degrees of freedom (DoF) requiring coordinated control. In this regard, the problem of automating the movement of such a multi-DoF chassis as well as automating the motion planning depending on situation based on sensor feedback becomes relevant. This article proposes a concept for a multi-degree chassis for a research lunar rover, including a design and layout scheme of the chassis and a method for its application, i.e., motion algorithms on various types of rough terrain. A methodology for control algorithms design is proposed, and a brief description of the developed algorithms and the simulation models of the chassis for its preliminary testing is provided. The final outcome of this work is expected to be a number of experimentally ob-

tained characteristics of the laboratory chassis model and the verification of the developed computer models and control algorithms of the multi-DOF chassis. Completing these tasks will provide scientific and technical groundwork for the motion control of wheeled- legged systems and improve the quality of lunar rovers' modeling and design. The results obtained at this stage allow us to move on to the manufacturing an experimental prototype and conducting physical experiments on this prototype to test the developed algorithms and simulation models. Experimental verification of the multi-DoF chassis control algorithms and their design methodology will improve the level of autonomy of future mobile robots designed to operate in extreme off-planet conditions.

Chassis; lunar rover; wheeled walking; wheeled-legged chassis; computer model; simulation modeling.

Введение. Возвращение интереса к исследованию поверхности Луны требует создания новых луноходов, т.е., мобильных робототехнических средств, способных передвигаться в условиях неопределённости лунной поверхности [1]. От системы передвижения исследовательского лунохода требуется обеспечение его подвижности в сложных условиях на сыпучем слабосвязанном грунте типа лунного реголита, движение на уклонах близких к углам естественного откоса грунта, преодоление значительных каменистых препятствий в районах прикратерного выброса обломочных материалов или в местах оголения коренных пород в морских и приматериковых районах Луны. При построении систем передвижения луноходов инженеры традиционно ориентируются на колёсные движители, которые отличает большая надёжность и энергоэффективность по сравнению с гусеничными движителями, что нашло отражение в конструкциях всех действовавших луноходов и многочисленных прототипов [2–4]. В то же время результаты отечественных и зарубежных исследований показывают, что фактическая область применения колёсных полноприводных шасси на лунном реголите (или грунтах-аналогах) ограничивается уклонами $18-22^\circ$ [5–7].

Расширить возможности шасси можно за счёт перехода от колёсного способа передвижения к колёсно-шагающему, реализующему различные алгоритмы движения, конечной целью которых является перенос центра масс корпуса машины в направлении движения при использовании заблокированных колёсных движителей в качестве опорных элементов подобно тому, как это делается при ходьбе. Как видно из рис. 1, адаптированного из работы [8], колёсно-шагающие шасси (КШШ) в сравнении с другими типами шасси позволяют получить наиболее сбалансированный набор свойств в части обеспечения максимальной подвижности в неструктурированной среде наряду с наибольшей энергоэффективностью.

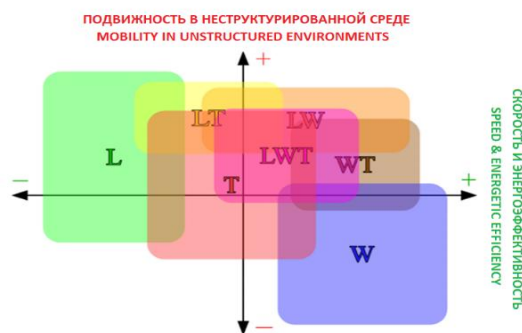


Figure 1. Mobility in unstructured environments vs. speed and energetic efficiency of the possible hybrid locomotion systems (Adapted with permission from [13], copyright 2012, L. Bruzzone and G. Quaglia).

Обозначения типов мобильных платформ: W – wheeled (колёсный), T – tracked (гусеничный), L – legged (шагающий), WT – wheeled-tracked (колёсно-гусеничный), LW – legged-wheeled (колёсно-шагающий), LT – legged-tracked (гусенично-шагающий), LWT – legged-wheeled-tracked (колёсно-гусенично-шагающий)

Рис. 1. Области существования мобильных платформ различных типов в системе координат «подвижность в неструктурированной среде» – «скорость и энергоэффективность»

В настоящей статье предлагается концепция многостепенного КШШ исследовательского лунохода, включающая конструктивно-компоновочную схему шасси и способ его применения, т.е. алгоритмы движения на пересечённой местности различного типа. Конечным результатом работы предполагается получение в ходе экспериментальных исследований ряда характеристик лабораторного макета шасси, проведение верификации разработанных компьютерных моделей и алгоритмов автоматического управления движением многостепенным КШШ. Выполнение этих задач позволит получить научно-технический задел в области управления движением колёсно-шагающими системами, повысить качество моделирования и проектирования луноходов.

Разрабатываемые алгоритмы необходимы:

- ♦ для общего повышения опорной и профильной проходимости путём реализации возможностей, заложенных в конструкцию КШШ: важнейшим фактором здесь является контроль и противодействие буксованию движителей [9];
- ♦ для автоматизации движения шасси по сложному рельефу и повышения точности автономного движения;
- ♦ для предотвращения опрокидывания [10, 11];
- ♦ для реализации дополнительных функциональных возможностей, получаемых от добавления приводов шагания [12].

Выбор схемного решения КШШ для проведения экспериментальных исследований. Широкие исследования КШШ проводились в нашей стране коллективом ВНИИтрансмаш под руководством Александра Леоновича Кемурджиана, – тем же коллективом, который создал шасси аппаратов «Луноход-1» и «Луноход-2» [2, 3]. Работы в области совершенствования систем передвижения напланетных транспортных средств продолжились и после завершения программы «Луноходов». Поиск путей повышения характеристик систем передвижения планетоходов привёл к созданию целого ряда экспериментальных самоходных шасси с колёсно-шагающими движителями (рис.2).

Опираясь на эти разработки, необходимо учитывать те факты, что с одной стороны, в то время уровень развития техники, в первую очередь, вычислительной, не позволял использовать в полном объёме все возможности КШШ, с другой стороны, – как по этой причине, так и из соображений экономии массы, разработчики применяли достаточно нетривиальные конструктивные решения, с тем, чтобы шагание осуществлялось нужным образом при использовании всего одного привода на один опорный элемент, как это и реализовано, например, в макетах КШМ и ЭОСАШ, показанных на рис. 2.

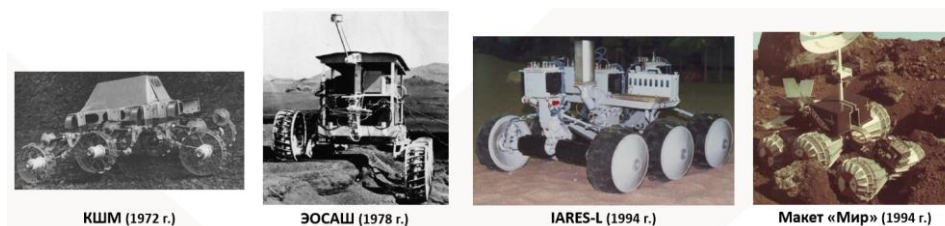


Рис. 2. Примеры макетов КШШ ВНИИтрансмаш

В любом случае, построение КШШ требует введения дополнительных приводов или специальных управляющих элементов приводов (например, фрикционных или электромагнитных тормозов), что, очевидно, означает определённое усложнение конструкции.

Исследование КШШ в наше время продолжается на новом уровне [13, 14], что привело к появлению огромного количества различных конструктивных решений, находящихся применение как в наземных мобильных роботах различного назначения, так и в прототипах планетоходов [15–21]. Необходимо отметить, что по способу осуществления колёсного шагания принципиально выделяют всего два способа: безотрывное шагание и отрывное шагание [2]. Однако, обобщая обзор различных вариантов конструктивной реализации КШШ, удобнее их рассматривать с точки зрения функциональных (кинема-

тических, динамических) особенностей, определяющих возможности реализации тех или иных алгоритмов передвижения (паттернов). Проведённый анализ показывает, что наибольшее распространение среди КШШ в настоящее время получили схемы, которые условно можно отнести к группе «колесо на ноге». Суть данных схем состоит в установке колеса на конце одно- или многостепенного механизма, – по сути вырожденного манипулятора (рис. 3).



Рис. 3. Варианты реализации КШШ типа «колесо на ноге»

В этой связи был выполнен анализ существующих схем КШШ, целью которого было определить необходимое и достаточное количество приводов шагания для построения рассматриваемого исследовательского лунохода и экспериментального макета КШШ.

Самый простой способ построения КШШ состоит в том, чтобы добавить по одному приводу шагания на каждый опорный элемент (колесо), как показано на рис. 3,а.

Уже такая схема принципиально позволяет реализовать режим колёсного шагания. Но при этом в общем случае не имеется возможности движения колесом по заданной траектории, – например, по прямой вдоль поверхности или более сложным образом. В результате, процесс шагания получается с неминуемым колебанием углового положения корпуса.

Кроме того, проблемой с точки зрения управления становится взаимовлияние одних управляемых параметров на другие. В качестве основных управляемых параметров при движении КШШ рассматриваются:

- ◆ ориентация корпуса – крен-тангаж (дифферент);
- ◆ положение центра масс системы относительно опорного многоугольника;
- ◆ углы контакта колёс с опорной поверхностью;
- ◆ распределение нагрузки по колёсам;
- ◆ величина клиренса, высоты корпуса, а также ширина колеи.

Для устранения отмеченных недостатков необходимо увеличивать количество приводов шагания на каждый опорный элемент. Так, уже два привода позволяют реализовать необходимую траекторию движения колеса в продольной плоскости механизма шагания (рис. 3,б). Дальнейшее увеличение степеней подвижности механизма шагания приводит к дополнительному увеличению кинематических и функциональных возможностей шасси (рис. 3,в). Но обоснованность расширения этих возможностей наряду с усложнением приводной системы, ростом нагрузки на вычислительный модуль бортовой системы управления, а также компоненты системы энергопитания требуют отдельного анализа в каждом конкретном случае с учётом общих требований, предъявляемых к роботу.

Руководствуясь этими соображениями в рамках настоящей работы для построения макета КШШ было принято решение остановиться на варианте двухступенного механизма шагания, так как дальнейшее повышение числа приводов связано с существенным усложнением и удорожанием системы, а также упомянутым ростом требований к служебным системам, что является весьма чувствительным вопросом при проектировании лунохода.

Так как в качестве объекта предполагаемого применения КШШ рассматриваются планетоходы, то особую важность приобретает критерий энергоэффективности, в особенности, на низких скоростях. Высокая энергоэффективность обуславливается двумя основными признаками:

- ♦ наличием в составе КШШ классических колёс для наиболее экономичного передвижения везде, где проходимость колёс достаточна (существуют варианты применения опорно-двигательных элементов отличных от простых колёс),
- ♦ статической устойчивостью схемы (в том числе, при совершении шага).

Нетрудно убедиться, что выбранная схема КШШ удовлетворяет и данному критерию по обоим пунктам.

Конструктивное построение исследовательского КШШ. В качестве базовой конструкции КШШ предполагается использовать четырёхопорное полноприводное и полностью управляемое колёсное шасси с двухступенными механизмами шагания на каждом из опорно-двигательных модулей (ОДМ). Внешний вид КШШ показан на рис. 4.

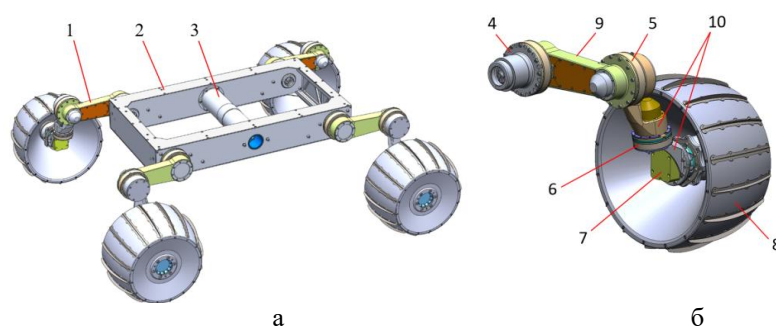


Рис. 4. Общая конструктивная схема КШШ; 1 – ОДМ; 2 – рама;
3 – механизм синхронизации; 4 – привод бедра (ПБ); 5 – привод колена (ПК);
6 – привод поворота колеса (РП); 7 – тяговый привод колеса (ТП); 8 – колесо;
9 – рычаг бедра; 10 – рычаг голени

Шасси предусматривает два режима работы: режим активной подвески, реализуемый за счёт механизмов шагания, и режим пассивной подвески, для реализации которого шасси оснащено системой тяг, обеспечивающих кинематически определённые связи между всеми ОДМ. Смена режимов работы шасси осуществляется за счёт специальных механизмов блокировки/разблокировки движения ОДМ относительно рамы.

На рис. 5 показаны основные возможности шасси при работе КШШ в режиме активной подвески, в том числе, преодоление уклонов с углом наклона поверхности до 30° в колёсно-шагающем режиме, движение через препятствия высотой до 500 мм, преодоление канав (рвов) шириной до 400 мм, а также в режиме пассивной подвески на примере движения через одиночное препятствие высотой 380 мм.

Конструкция КШШ предусматривает ряд дополнительных функциональных возможностей, таких как:

- ♦ изменение клиренса (дорожного просвета) от максимального значения с вертикально развёрнутыми рычагами ОДМ до нулевого, соответствующего посадке дна корпуса КШШ на грунт,
- ♦ изменение колёсной базы в диапазоне от -700 до +400 мм относительно номинального положения, показанного на рис. 4,а,
- ♦ разворот на месте за счёт качения колёс по окружности,
- ♦ движение крабовым ходом.

Конструкция КШШ предусматривает ряд дополнительных функциональных возможностей, таких как:

- ♦ изменение клиренса (дорожного просвета) от максимального значения с вертикально развёрнутыми рычагами ОДМ до нулевого, соответствующего посадке дна корпуса КШШ на грунт;

- ♦ изменение колёсной базы в диапазоне от -700 до +400 мм относительно номинального положения, показанного на рис. 4,а;
- ♦ разворот на месте за счёт качения колёс по окружности;
- ♦ движение крабовым ходом.



Рис. 5. Преодоление КПП различных типов препятствий

Разработка алгоритмов движения. КПП в широком смысле теоретически дают возможность реализации трёх режимов движения: чисто колёсного (как обычное колёсное шасси без задействования механизмов шагания), чисто шагающего (приводы колёс зафиксированы) и гибридного (одновременно функционируют и колёса, и приводы шагания). Вопросы управления КПП продолжают быть актуальными в научном сообществе. При этом в научной литературе сформировалось уже достаточно много общепринятых подходов, в частности, повсеместное применение трёхуровневой системы управления [22], с редкими нюансами, а также описание движения при помощи паттернов, известных также, как типовые операции (ТОП) [23]. Такие паттерны существуют для всех трёх перечисленных возможных режимов работы КПП (колёсного, шагающего, гибридного).

Паттерны колёсного режима. Для колёсного режима применяемые паттерны, наверное, очевидны, и не требуют подробной на них остановки. В целом, управление движением в колёсном режиме сводится к трём принципиально различным паттернам:

- ♦ «синхронному» (синхронное изменение ориентации управляемых колёс на одинаковый угол и направление),
- ♦ симметричному (маневрирование с ориентацией управляемых колёс симметрично относительно поперечной оси платформы),
- ♦ танковому ходу (маневрирование за счёт разницы угловых скоростей колёс противоположных бортов) [24].

Паттерны шагающего режима. В шагающем режиме известно огромное количество паттернов, среди которых:

- ♦ простое шагание всеми ОДМ поочерёдно,
- ♦ рысь – когда шагают одновременно диагональные конечности,
- ♦ различные прыжковые варианты – подсакивание, продольные прыжки, непрерывные сальто – вперёд или назад [25].

Паттерны гибридного режима. В гибридном (колёсно-шагающем) режиме наиболее распространены циркульные ходы [26, 27] и режим активной подвески, в котором колёса находятся в контакте с поверхностью, а задача состоит в поддержании заданного крена, дифферента, клиренса и прочих параметров [28, 29]. Преодоление ступеней, прямых и наклонных, также обычно выполняют специальным паттерном [30]. Возможны также одиночный [31] и побортвой безотрывный шаг. Алгоритмы управления через динамические паттерны в настоящее время являются темой активных исследований, подробное представление о которой даёт работа [32].

Построение сценариев движения. Чтобы строить из паттернов сценарии, шасси должно быть способно эти отдельные паттерны выполнять, обеспечивая устойчивость и точность движения. Для исследуемого шасси было разработано три группы ТОП. Для каждой ТОП разработаны регуляторы на основе обратной модели динамики (см. выражения (1) и (2)).

Первую группу составляют пошарнирные режимы, в том числе управление шарниром в общем виде (паттерн «Joint») и несколько производных паттернов, среди которых:

- ◆ переход в домашнее положение (номинальную конфигурацию) («Home»);
- ◆ прямое управление поворотом колёс («Steer»);
- ◆ прямое управление скоростью колёс («Drive»);
- ◆ поворот на месте («SpotTurn»).

$$\tau_{md} = M(q)v + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q), \quad (1)$$

$$v = \ddot{q}_d + K_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_P(q_d - q), \quad (2)$$

где τ_{md} – вектор задающих значений моментов шарниров, v – вектор управляющих воздействий, M – матрица инерции, C – матрица коэффициентов центробежных и Кориолисовых сил, $g(q)$ – вектор гравитационных сил q , $\dot{q}$ – фактическое положение и скорость шарниров, q_d , $\dot{q}_d$, $\ddot{q}_d$ – желаемые значения положений, скоростей и ускорений шарниров, K_P , K_D – матрицы коэффициентов ПД-регулятора.

Вторая группа алгоритмов отвечает за управление отдельным ОДМ, а именно – его рабочей точкой. Разработаны регуляторы для скоростного, позиционного, траекторного и гибридного сило-позиционного режимов. Для траекторного режима закон управления описывается следующими уравнениями:

$$\bar{v}_d = k_v(p_d - p_a), \quad (3)$$

$$v_d = \bar{v}_d + k_{ve}(\bar{v}_d - v_a), \quad (4)$$

$$\dot{q}_d = J^{-1}v_d \quad (5)$$

где $\bar{v}_d$ – номинальное значение скорости для компенсации ошибки по положению, p_d , p_a – желаемое и фактическое положение шасси, v_d – задающее значение скорости с учётом компенсации ошибки по отработке скорости, k_v , k_{ve} – коэффициенты регулятора, $\dot{q}_d$ – задающее значение скорости шарниров, J – матрица Якоби ОДМ.

Отличие законов управления для прочих режимов заключается в расчёте номинальной скорости $\bar{v}_d$.

Отдельно реализованы ТОП безотрывный шаг («SlideStep») и простой (отрывный) шаг («Step»). Безотрывный шаг обеспечивает движение центра колеса вперёд, в то время как скорость вращения колеса задаётся исходя из условия отсутствия проскальзывания, а в вертикальной проекции обеспечивается контроль усилия.

Безотрывный шаг может выполняться одним ОДМ, либо парой. Если это пара диагональная – реализуется безотрывный вариант паттерна «рысь», если пары располагаются по осям – вариант циркульного хода. Отрывный шаг состоит из трёх движений: движения вверх и вперёд выполняются в позиционном режиме, а вниз – с контролем усилия.

Таким образом, первые две группы ТОП описывают движение отдельных узлов и подсистем КШШ.

Для управления на уровне шасси в целом разработана третья группа ТОП, включающая колёсные – симметричный «PlaneMotion» и синхронный «CrabLine», режим управления конфигурацией «Posture», а также два режима соответствующие совмещению управления конфигурацией с каждым из колёсных режимов («FullMotion» и «CrabMotion» соответственно). Режим «Posture» обеспечивает управление креном, дифферентом, высотой шасси, а также вылетом всех ОДМ, и, как следствие, – клиренсом и колёсной базой. Если задача ограничивается стабилизацией всех этих параметров, то результатом является режим активной подвески.

Для отработки алгоритмов было разработано два механизма создания сценария – через скриптовый файл и через графический интерфейс. В обоих случаях результатом является таблица, каждая строка которой характеризует соответствующую ТОП.

Механизм исполнения сценария показан на рис. 6,а, для перехода к следующей ТОП необходимо успешное выполнение условия завершения предыдущей ТОП.

Пример сценария, составленного из разработанных ТОП, представлен на рис. 6,б.

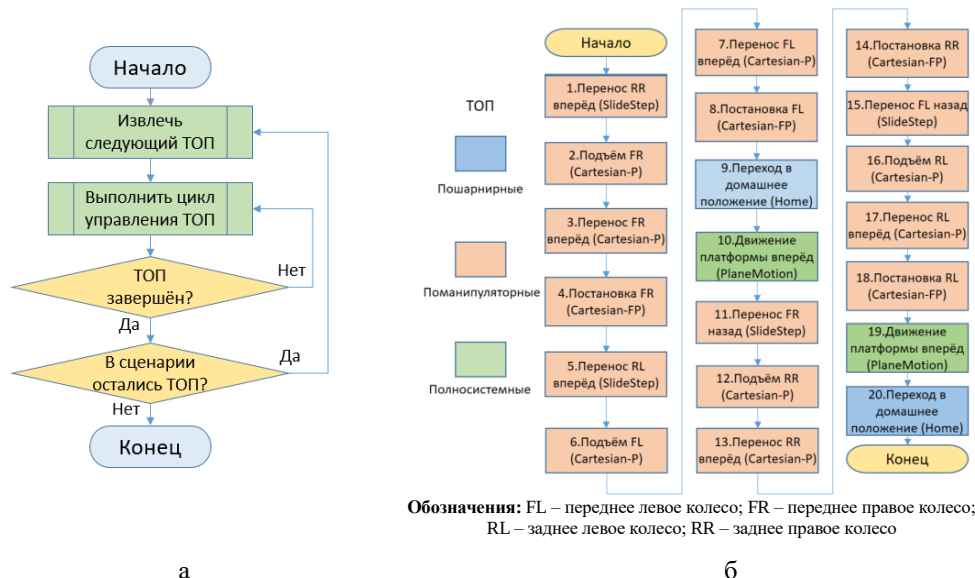


Рис. 6. Механизм исполнения (слева) и пример сценария (справа)

Построение компьютерной модели КШШ. Проверка работоспособности алгоритмов движения и концепции шасси в целом проводилась путём моделирования. Модели КШШ были разработаны в двух вариантах: первый в среде Matlab-ADAMS, второй в среде Matlab-Simscapе Multibody, где в ADAMS и в модуле Simscapе Multibody моделируется физика движения шасси, а в Matlab-Simulink реализованы алгоритмы управления. От моделей требовалось передать основные физические взаимодействия – влияние силы тяжести, сил динамики и контактных усилий. Разница между двумя вариантами «физическими» (динамическими) моделями (ADAMS, Simscapе Multibody) заключается в различных подходах к описанию и моделированию (симуляции) процесса взаимодействия колеса с опорной поверхностью. Впоследствии при сравнении моделей с макетом планируется получить некоторую верифицированную модель, которую можно было бы использовать в проектировании других подобных систем.

На рис. 7,а показана структура модели в Matlab-Simulink. В ней за управление отвечают два блока – диспетчер задач «Script Manager» и непосредственно регулятор исполнения движения «Controller». Внешний вид динамической модели, подготовленной в MSC ADAMS показан на рис. 7,б. Управление моделью осуществляется путём передачи задающего момента шарниров в модель динамики. В ADAMS управляющий момент, таким образом, подаётся непосредственно на соответствующие тела в виде силовых компонентов «Однокомпонентный момент» (Single-component Torque).

Среди предполагаемых режимов функционирования шасси можно выделить два наиболее характерных: поддержание ориентации корпуса в режиме активной подвески и подъём на уклон в режиме безотрывного шагания.

Для проверки разработанных алгоритмов в части реализации режима активной подвески было проведено два компьютерных эксперимента, в которых задача заключалась в преодолении некоторой эстакады (подъём-плато-спуск), как показано слева на рис. 8.

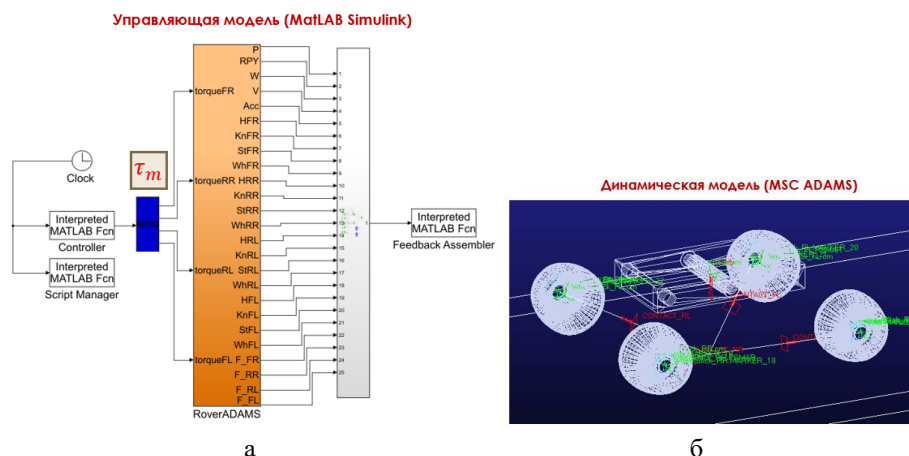


Рис. 7. Компьютерная имитационная модель КШШ

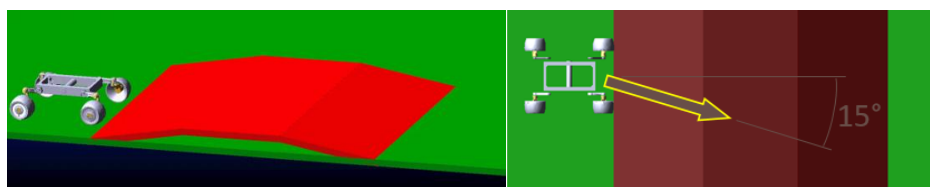


Рис. 8. Схемы компьютерных экспериментов движения КШШ в режиме активной подвески (слева преодоление препятствия вдоль линии наибольшего подъёма, справа – под углом к линии наибольшего подъёма)

В первом случае задача состояла во фронтальном преодолении горки в направлении максимального подъёма. На рис. 9 слева показано движение в режиме без стабилизации корпуса, справа – со стабилизацией корпуса.

Управление движением КШШ на рис. 9 выполняется с учётом допущения, что известны все координаты и вектор скорости платформы, а также силы контакта колёс с поверхностью. В обеспечение получения данных параметров на реальном макете в создаваемом КШШ планируется добавить оценку скорости и перемещения платформы с учётом проскальзывания по данным экстероцептивных датчиков, а также оценку сил контакта с поверхностью, для чего в конструкции предусмотрена установка силомоментных датчиков на колёсах.

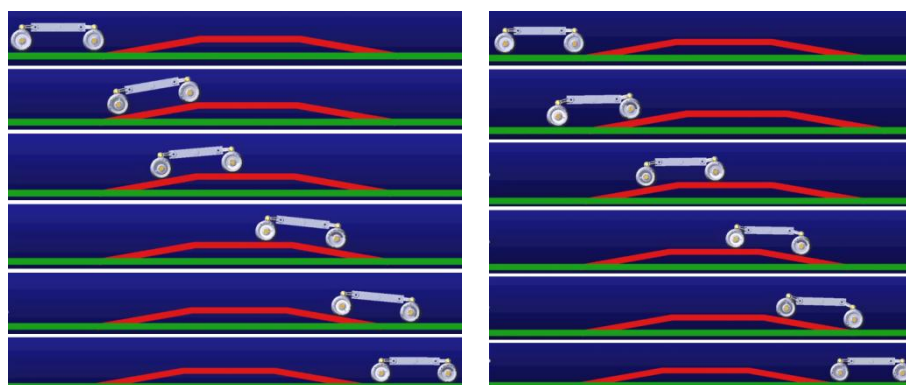


Рис. 9. Движение КШШ через препятствие «эстакада» без стабилизации корпуса (слева) и со стабилизацией корпуса (справа)

На рис. 10 показаны графики изменения дифферента и скорости платформы во время движения по рис. 9. Полученные результаты подтверждают работу алгоритма, демонстрируя наличие стабилизации корпуса в ходе движения, хотя и не полностью (отклонение от нулевого положения по графику на рис. 10 составляет около $\pm 1,5^\circ$). Цель более строгого поддержания положения корпуса (построения более точного регулятора) на данный момент представляется нецелесообразной, так как предварительно необходимо произвести верификацию модели. По графикам скорости видно, что в обоих режимах завершение движения происходит практически одновременно, то есть, выполнение сценария происходит без потерь или выигрыша времени.

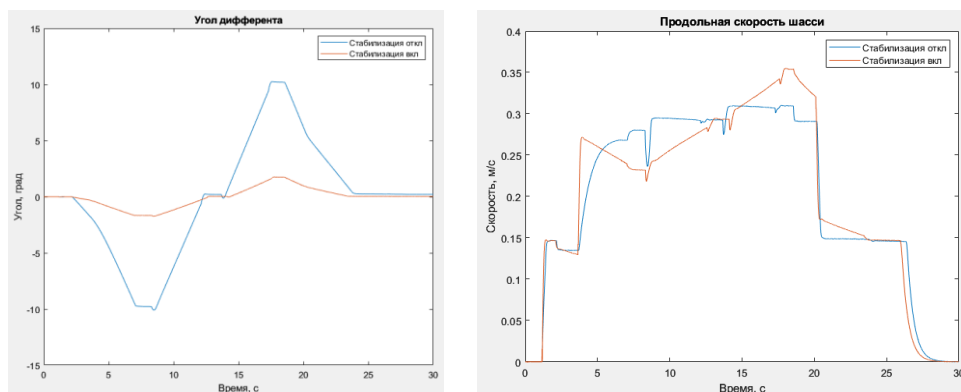


Рис. 10. Графики изменение дифферента корпуса (слева) и скорости КШШ (справа) при движении через препятствие «эстакада» вдоль линии наибольшего подъёма

Во втором случае (рис. 8, справа), при изменении тактики преодоления уклона, когда движение происходит под некоторым углом к направлению максимального подъёма, дополнительно присутствует ещё и некоторый выигрыш по времени, как следует из графиков на рис. 11. При этом, в отличие от случая по рис. 9, 10, который в общем случае является «плоской» схемой движения, в данном «неплоском» варианте стабилизация осуществляется по двум координатам: и по дифференту, и по углу крена (рис. 11, слева). Таким образом, полученные результаты подтвердили работоспособность алгоритма и в этом более общем случае движения.

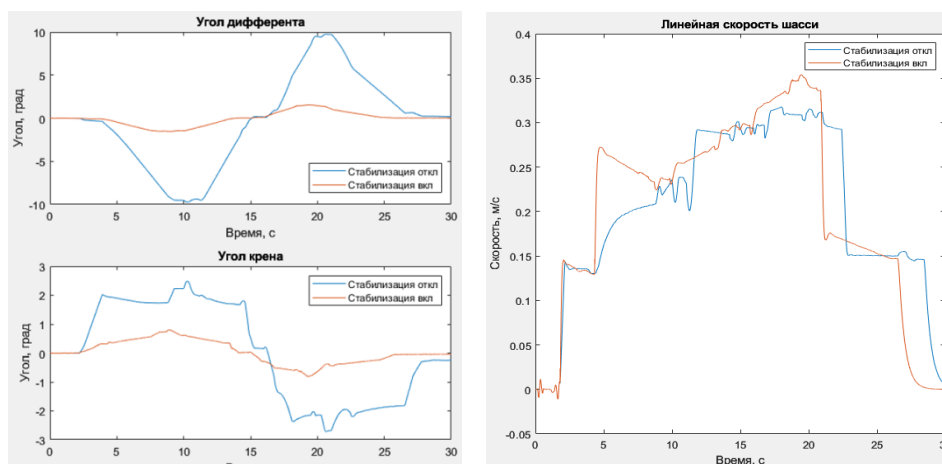


Рис. 11. Графики изменение углов наклона корпуса (слева) и скорости КШШ (справа) при движении через препятствие «эстакада» под углом к линии наибольшего подъёма

Преодоление уклонов в режиме безотрывного шагания заключается в поочередном выносе вперёд колёсных опор с их одновременным перекачиванием по поверхности при заблокированных остальных колёсах, не работающих в этот момент, и в переносе на заключительном этапе вперёд корпуса за счёт согласованной работы всех приводов шагания при неподвижных относительно поверхности колёсах, выполняющих роль опорных элементов. На рис. 12 представлены фрагменты моделирования данного режима, иллюстрирующие последовательность этапов совершения одного шага.

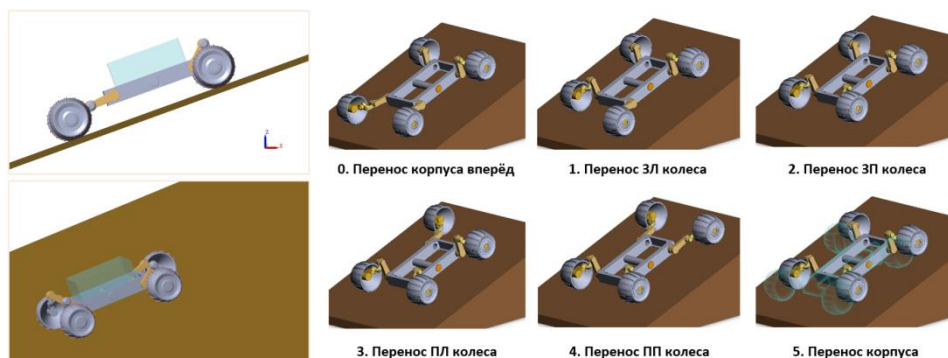


Рис. 12. Фрагменты моделирования колёсно-шагающего режима движения КШШ

Проверка алгоритма данного колёсно-шагающего режима проводилась на модели, построенной в пакете Matlab-Simscapе Multibody. Сам сценарий также задавался в Matlab и готовился на основе разработанных ТОП. Моделирование подтвердило общую работоспособность алгоритма движения. На рис. 13 показаны графики изменения во времени за период двух шагов углов поворота звеньев бедра и голени каждого из ОДМ.

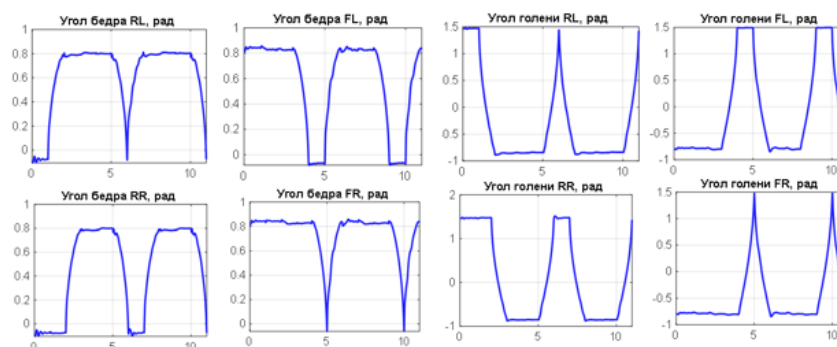


Рис. 13. Изменение углов поворота звеньев ОДМ в колёсно-шагающем режиме движения на уклоне

Заключение. Исследования, описанные в настоящей статье, направлены на разработку алгоритмов автоматического управления движением колёсно-шагающего шасси мобильного робота-планетохода. Конечная цель проекта, в рамках которого выполнено настоящее исследование, заключается в экспериментальной отработке разработанных алгоритмов и, в общем смысле, – в отработке методических подходов к разработке алгоритмов управления на основе экспериментально верифицированных компьютерных моделей, что создаст основу для повышения качества проектирования систем передвижения будущих луноходов, имеющих возможность реализации различных вариантов колёсно-шагающих режимов движения.

В работе дано краткое обоснование и описана общая концепция многостепенного КШШ, разрабатываемого в качестве объекта будущих экспериментальных исследований. Данная концепция, условно отнесённая к группе КШШ типа «колесо на ноге», строится

на основе четырёх однотипных ОДМ, оснащённых двухступенным механизмом шагания. Функциональные возможности рассматриваемой схемы КШШ позволяют реализовывать алгоритмы преодоления таких препятствий как песчаные уклоны с углами наклона, соответствующими углам естественного откоса грунта (30° - 32°), преодолевать канавы и одиночные препятствия типа камней высотой, превышающей диаметр колеса, реализовывать различные варианты алгоритмов маневрирования.

На основании функциональных возможностей КШШ и теоретических проработок предложена методика построения сценариев его функционирования на основе типовых операций из набора предварительно разработанных для КШШ выбранного типа типовых операций (так называемых, паттернов движения). Предложена методика построения компьютерной имитационной модели КШШ. Проверка разработанных алгоритмов на имитационной модели подтвердила их работоспособность и адекватность.

Дальнейшие направления исследований направлены на подготовку и проведение экспериментальных работ как на отдельных элементах, так и на КШШ в целом, с целью идентификации и уточнения параметров имитационных моделей, а также отработки разработанных алгоритмов как на верифицированных моделях, так и на макете КШШ.

Работа выполнена в рамках государственного задания на 2026 г. № 075- 00558-26-00 от 12.01.2026 на тему «Разработка и экспериментальные исследования алгоритмов автоматического управления движением колёсно-шагающего шасси мобильного робота для передвижения в экстремальных напланетных условиях и при неопределённости характеристик подстилающей поверхности» (FNRG-2025-0018) 1024061000019-4-2.2.2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев А.В. [и др.]. Разработка предложений по составу и техническому облику группировки мобильных РТС для реализации программы исследования и освоения Луны // Сб. тезисов 31-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». – СПб.: ИПЦ ООО «Политехника-принт», 2020. – С. 146-149.
2. Планетоходы / под ред. А.Л. Кемурджиана. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 400 с.
3. Li C. et al. Overview of the Chang'e-4 mission: Opening the frontier of scientific exploration of the lunar far side // Space Science Reviews. – 2021. – Vol. 217, No. 2. – P. 35.
4. Ghosh R. et al. Path Planning for the Pragyan Rover: Experiences and Challenges // 2024 International Conference on Space Robotics (iSpaRo). – IEEE, 2024. – P. 70-75.
5. Передвижение по грунтам Луны и планет / под ред. А.Л. Кемурджиана. – М.: Машиностроение, 1986. – 272 с.
6. Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1 / под ред. В.Л. Барсукова. – М.: Наука, 1978. – Т. 2. – 184 с.
7. Черкасов И.И., Кемурджиан А.Л., Шварёв В.В., Громов В.В. Автоматические станции для изучения поверхностного покрова Луны. – М.: Машиностроение, 1976. – 200 с.
8. Bruzzone L., Nodehi S.E., Fanghella P. Tracked locomotion systems for ground mobile robots: A review // Machines. – 2022. – Vol. 10, Issue 8. – Article 648. – DOI: 10.3390/machines10080648,
9. Маленков М.И., Волов В.А., Лазарев Е.А. Методы и результаты анализа качества ходовой части планетоходов // Вестник машиностроения. – 2016. – № 7. – С. 6-13.
10. Почежерцев А.Г. [и др.]. Исследование возможных причин неустойчивого поведения колёсного РТК на наклонной поверхности с использованием компьютерной модели // Тр. 31-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». – СПб., 2020. – С. 63-72.
11. Vasiliev A.V., Shardyko I.V. Analysis, detection, reaction and prevention of potential critical situations for light-weight mobile robots // Proceedings of the International Scientific and Technological Conference «Extreme Robotics». – SaintPetersburg: ООО "Izdatel'sko-poligraficheskii kompleks «Gangut», 2019. – P. 559-567.
12. Васильев А.В., Шардыко И.В. Разработка и моделирование многостепенного колёсно-шагающего шасси лунохода // Сб. тезисов 36-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». – СПб.: ИПЦ ООО «Политехника-принт», 2025. – С. 330-333.
13. Bjelonic M. [et al.]. A Survey of Wheeled-Legged Robots // Robotics in Natural Settings. CLAWAR 2022: Lecture Notes in Networks and Systems. Vol.530 / ed. by J.M. Cascalho [et al.]. – Springer, 2022. – P. 83-94. – DOI: 10.1007/978-3-031-15226-9_11.

14. *García J.M., Duarte F.G.* Mobile rolling robots designed to overcome obstacles: A review // *Forces in Mechanics*. – 2024. – Vol. 16, No. 100283. – DOI: 10.1016/j.finmec.2024.100283.
15. *Yakubu M. [et al.]*. A novel mobility concept for terrestrial wheel-legged lunar rover // *IEEE Access*. – 2025.
16. Flexibility and granular terrain adaptability of a linkage-based wheel-legged robot: LinkWhег // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. – 2025.
17. *Yang H. [et al.]*. Adaptive Active Compliance Control for Wheel-Legged Vehicles on Uneven Roads Based on a Parallel Integrated Framework // *2024 8th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI)*. – IEEE, 2024. – P. 1-6.
18. *Добрецов Р.Ю., Попов Д.С., Прямыцын И.Б.* Обоснование базовых параметров реконфигурируемого шасси с планетарно-колёсным двигателем // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2023. – Т. 11, № 3. – С. 232-239.
19. *Bouton A. [et al.]*. Experimental study of alternative rover configurations and mobility modes for planetary exploration // *2023 IEEE Aerospace Conference*. – IEEE, 2023. – P. 1-13.
20. *Pan D. [et al.]*. Design and verification of the active suspension mobility system of the Zhurong Mars rover // *Scientia Sinica Technologica*. – 2022. – Vol. 52, No. 2. – P. 278-291.
21. *Skibbe J., Barthelmes S., Buse F.* Locomotion control functions for the active chassis of the MMX rover // *2021 IEEE Aerospace Conference, AERO 2021*. – 2021.
22. *Barthelmes S., Konigorski U.* Model-based chassis control system for an over-actuated planetary exploration rover // *At-Automatisierungstechnik*. – 2020. – Vol. 68, No. 1. – P. 58-71.
23. *De Luca A. [et al.]*. Autonomous obstacle crossing strategies for the hybrid wheeled-legged robot centauro // *Frontiers in Robotics and AI*. – 2021. – Vol. 8. – P. 721001.
24. *Lin C.J. [et al.]*. Design and implementation of a 4WS4WD mobile ro-bot and its control applications // *2013 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*. – IEEE, 2013. – P. 235-240.
25. *Zhou Q. [et al.]*. Max: A wheeled-legged quadruped robot for multimodal agile locomotion // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 21, No. 4. – P. 7562-7582.
26. *Pan D. [et al.]*. Design and verification of the active suspension mobility system of the Zhurong Mars rover // *Scientia Sinica Technologica*. – 2022. – Vol. 52, No. 2. – P. 278-291.
27. *Cao C. [et al.]*. Push-pull locomotion: Increasing travel velocity in loose regolith via induced wheel slip // *Journal of Terramechanics*. – 2023. – Vol. 110. – P. 87-99.
28. *Cordes F., Kirchner F., Babu A.* Design and field testing of a rover with an actively articulated suspension system in a Mars analog terrain // *Journal of Field Robotics*. – 2018. – Vol. 35, No. 7. – P. 1149-1181.
29. *Bouloubasis A.K., McKee G.* VOL.A Multitasking Surface Exploration Rover System // *Bioinspiration and Robotics Walking and Climbing Robots*. – IntechOpen, 2007.
30. *Zhu B. [et al.]*. Probabilistic path planning for wheel-legged rover in dense environment based on extended MDP and configuration topology analysis // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2025.
31. *Halme A. [et al.]*. WorkPartner: interactive human-like service robot for outdoor applications // *The international journal of robotics Research*. – 2003. – Vol. 22, No. 7-8. – P. 627-640.
32. *Bjelonic M.* Planning and control for hybrid locomotion of wheeled-legged robots: diss. – ETH Zurich, 2021.

REFERENCES

1. *Vasil'ev A.V. [i dr.]*. Razrabotka predlozheniy po sostavu i tekhnicheskomu obliku gruppirovki mobil'nykh RTS dlya realizatsii programmy issledovaniya i osvoeniya Lunny [Development of proposals for the composition and technical design of a group of mobile robotic systems for the implementation of the lunar exploration and development program], *Sb. tezisov 31-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Ekstremal'naya robototekhnika»* [Proceedings of the 31st International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics"]. Saint-Petersburg: IPTS OOO «Politekhnikaprint», 2020, pp. 146-149.
2. *Planetokhody* [Planet rovers], ed. by A.L. Kemurdzhiana. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 400 p.
3. *Li C. et al.* Overview of the Chang'e-4 mission: Opening the frontier of scientific exploration of the lunar far side, *Space Science Reviews*, 2021, Vol. 217, No. 2, pp. 35.
4. *Ghosh R. et al.* Path Planning for the Pragyan Rover: Experiences and Challenges, *2024 International Conference on Space Robotics (iSpaRo)*. IEEE, 2024, pp. 70-75.
5. *Peredvizhenie po gruntam Lunny i planet* [Lunar and planets soil locomotion], ed. by A.L. Kemurdzhiana. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 272 p.
6. *Peredvizhnaya laboratoriya na Lune Lunokhod-1* [Mobile laboratory on the Moon Lunokhod-1], ed. by V.L. Barsukova. Moscow: Nauka, 1978, Vol. 2, 184 p.

7. Cherkasov I.I., Kemurdzhian A.L., Shvarev V.V., Gromov V.V. Avtomaticheskie stantsii dlya izucheniya poverkhnostnogo pokrova Luny [Automatic stations for Lunar surface layer survey]. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 200 p.
8. Bruzzone L., Nodehi S.E., Fanghella P. Tracked locomotion systems for ground mobile robots: A review, *Machines*, 2022, Vol. 10, Issue 8, Article 648. DOI: 10.3390/machines10080648,
9. Malenkov M.I., Volov V.A., Lazarev E.A. Metody i rezul'taty analiza kachestva khodovoy chasti planetokhodov [Methods and results of analysis of the quality of the chassis of planetary rovers], *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 2016, No. 7, pp. 6-13.
10. Pochezhertsev A.G. [i dr.]. Issledovanie vozmozhnykh prichin neustoychivogo povedeniya kolesnogo RTK na naklonnoy poverkhnosti s ispol'zovaniem komp'yuternoy modeli [Study of possible causes of unstable behavior of a wheeled mobile robot on an inclined surface using a computer model], *Tr. 31-y Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Ekstremal'naya robototekhnika»* [Proceedings of the 31-th International scientific and technical conference «Extreme robotics»]. Saint Petersburg, 2020, pp. 63-72.
11. Vasiliev A.V., Shardyko I.V. Analysis, detection, reaction and prevention of potential critical situations for light-weight mobile robots, *Proceedings of the International Scientific and Technological Conference «Extreme Robotics»*. Saint Petersburg: OOO "Izdatel'sko-poligraficheskii kompleks «Gangut», 2019, pp. 559-567.
12. Vasil'ev A.V., Shardyko I.V. Razrabotka i modelirovanie mnogostepennogo kolesno-shagayushchego shassi lunokhoda [Design and simulating of an articulated wheeled-legged chassis of the lunar rover], *Sb. tezisev 36-y Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Ekstremal'naya robototekhnika»* [Proceedings of the 36th International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics"]. Saint Petersburg: IPTS OOO «Politehnika-print», 2025, pp. 330-333.
13. Bjelonic M. [et al.]. A Survey of Wheeled-Legged Robots // *Robotics in Natural Settings. CLAWAR 2022: Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol.530, ed. by J.M. Cascalho [et al.]. Springer, 2022, pp. 83-94. DOI: 10.1007/978-3-031-15226-9_11.
14. Garcia J.M., Duarte F.G. Mobile rolling robots designed to overcome obstacles: A review, *Forces in Mechanics*, 2024, Vol. 16, No. 100283. DOI: 10.1016/j.finmec.2024.100283.
15. Yakubu M. [et al.]. A novel mobility concept for terrestrial wheel-legged lunar rover, *IEEE Access*, 2025.
16. Flexibility and granular terrain adaptability of a linkage-based wheel-legged robot: LinkWhег, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2025.
17. Yang H. [et al.]. Adaptive Active Compliance Control for Wheel-Legged Vehicles on Uneven Roads Based on a Parallel Integrated Framework, *2024 8th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI)*. IEEE, 2024, pp. 1-6.
18. Dobretsov R.Yu., Popov D.S., Pryamitsyn I.B. Obosnovanie bazovykh parametrov rekonfiguriruemogo shassi s planetarno-kolesnym dvizhitelem [Justification of the basic parameters of a reconfigurable chassis with a planetary-wheel drive], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2023, Vol. 11, No. 3, pp. 232-239.
19. Bouton A. [et al.]. Experimental study of alternative rover configurations and mobility modes for planetary exploration, *2023 IEEE Aerospace Conference*. IEEE, 2023, pp. 1-13.
20. Pan D. [et al.]. Design and verification of the active suspension mobility system of the Zhurong Mars rover, *Scientia Sinica Technologica*, 2022, Vol. 52, No. 2, pp. 278-291.
21. Skibbe J., Barthelmes S., Buse F. Locomotion control functions for the active chassis of the MMX rover, *2021 IEEE Aerospace Conference, AERO 2021*, 2021.
22. Barthelmes S., Konigorski U. Model-based chassis control system for an over-actuated planetary exploration rover, *At-Automatisierungstechnik*, 2020, Vol. 68, No. 1, pp. 58-71.
23. De Luca A. [et al.]. Autonomous obstacle crossing strategies for the hybrid wheeled-legged robot centauro, *Frontiers in Robotics and AI*, 2021, Vol. 8, pp. 721001.
24. Lin C.J. [et al.]. Design and implementation of a 4WS4WD mobile ro-bot and its control applications, *2013 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*. IEEE, 2013, pp. 235-240.
25. Zhou Q. [et al.]. Max: A wheeled-legged quadruped robot for multimodal agile locomotion, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2023, Vol. 21, No. 4, pp. 7562-7582.
26. Pan D. [et al.]. Design and verification of the active suspension mobility system of the Zhurong Mars rover, *Scientia Sinica Technologica*, 2022, Vol. 52, No. 2, pp. 278-291.
27. Cao C. [et al.]. Push-pull locomotion: Increasing travel velocity in loose regolith via induced wheel slip, *Journal of Terramechanics*, 2023, Vol. 110, pp. 87-99.
28. Cordes F., Kirchner F., Babu A. Design and field testing of a rover with an actively articulated suspension system in a Mars analog terrain, *Journal of Field Robotics*, 2018, Vol. 35, No. 7, pp. 1149-1181.

29. Bouloubasis A.K., McKee G. VOLA Multitasking Surface Exploration Rover System, *Bioinspiration and Robotics Walking and Climbing Robots*. IntechOpen, 2007.
30. Zhu B. [et al.]. Probabilistic path planning for wheel-legged rover in dense environment based on extended MDP and configuration topology analysis, *IEEE Transactions on Robotics*, 2025.
31. Halme A. [et al.]. WorkPartner: interactive human-like service robot for outdoor applications, *The international journal of robotics Research*, 2003, Vol. 22, No. 7-8, pp. 627-640.
32. Bjelonic M. Planning and control for hybrid locomotion of wheeled-legged robots: diss. ETH Zurich, 2021.

Васильев Андрей Викторович – Государственный научный центр РФ – Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»; e-mail: andrey@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125526093; к.т.н.; с.н.с.

Шардыко Игорь Вячеславович – Государственный научный центр РФ – Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»; e-mail: i.shardyko@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125526093; н.с.

Жуков Юрий Александрович – Государственный научный центр РФ – Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»; e-mail: yu.zhukov@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125524700; ведущий программист.

Vasiliev Andrey Viktorovich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: andrey@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125526093; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Shardyko Igor Vyacheslavovich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: i.shardyko@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125526093; researcher.

Zhukov Yuriy Alexandrovich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: yu.zhukov@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125524700; leading programmer.

УДК 629.584

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-120-135

А.Ю. Коноплин, А.П. Юрманов, А.Ю. Родионов, Р.П. Василенко, М.О. Панчук
МЕТОД ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПЕРАТОРА И АНПА,
ОСНАЩЕННОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМ КАНАЛОМ СВЯЗИ,
ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЦЕЛЕВЫХ ОБЪЕКТОВ

Выполнение автономными необитаемыми подводными аппаратами (АНПА) инспекционных и манипуляционных операций под контролем оператора ограничено низкой пропускной способностью гидроакустического канала связи, не позволяющей передавать видеопоток и качественные фотоизображения в реальном времени. В то же время существующие методы автоматического распознавания целевых объектов бортовыми системами технического зрения АНПА не гарантируют точного определения местоположения и формы объекта при наличии на нем дефектов (заиливание, биологические обрастания, механические повреждения). Для решения указанной проблемы в статье ставится задача разработки метода, обеспечивающего посредством низкопропускного гидроакустического канала связи информационное взаимодействие оператора с АНПА для оценки оператором качества распознавания целевых объектов с последующим формированием целеуказаний для аппарата и его бортового манипулятора. В основе метода используется алгоритм идентификации объектов с дефектами, использующий модифицированное ИСР-совмещение облаков точек с исключением дефектных областей и характерных особенностей (ХО). Выявленные ХО и области дефектов преобразуются в компактный набор геометрических примитивов, передаваемый оператору по гидроакустическому каналу связи с АНПА. На основе полученной информации, поступающей от АНПА телеметрии, а также эталонной трёхмерной модели объекта графический интерфейс визуализирует сканируемую сцену, позволяя оператору оценить точность распознавания. Натурные испытания метода проводились с использованием гидроакустического модема производства ИПМТ ДВО РАН и бортового вычислителя NVIDIA Jetson TX2. Передаваемый в

течение минуты информационный пакет содержал тип объекта, его положение, карту дефектов и описание ХО при объеме данных, на три порядка меньшем по сравнению с передачей полного облака точек сканируемого объекта. На основе полученной информации оператор подтверждал успешность идентификации объекта, до 30% площади поверхности которого были покрыты дефектами. Практическая значимость метода заключается в возможности выполнения ответственных миссий под контролем оператора в условиях неопределенности окружающей среды.

Автономный необитаемый подводный аппарат; многозвенный манипулятор; система технического зрения; идентификация объектов; подводные операции; гидроакустический канал связи; облака точек; алгоритм ICP; передача данных.

A.Yu. Konoplin, A.P. Yurmanov, A.Yu. Rodionov, R.P. Vasilenko, M.O. Panchuk

**METHOD FOR INFORMATION INTERACTION BETWEEN AN OPERATOR
AND AN AUV EQUIPPED WITH A HYDROACOUSTIC COMMUNICATION
CHANNEL FOR TARGET OBJECT IDENTIFICATION**

The execution of inspection and manipulation operations by autonomous unmanned underwater vehicles (AUVs) under operator supervision is limited by the low bandwidth of the hydroacoustic communication channel, which does not allow the transmission of video streams and high-quality photographic images in real time. At the same time, existing methods for automatic recognition of target objects by onboard machine vision systems of AUVs do not guarantee accurate determination of the object's position and shape when defects are present on its surface (siltation, biofouling, mechanical damage). To address this problem, the paper formulates the task of developing a method that enables information interaction between the operator and the AUV via a low-bandwidth hydroacoustic communication channel. This interaction allows the operator to evaluate the quality of target object recognition and subsequently generate target designations for the vehicle and its onboard manipulator. The proposed method is based on an algorithm for identifying objects with defects, which employs a modified ICP point cloud registration approach with the exclusion of defective regions and characteristic features (CFs). The detected CFs and defect regions are transformed into a compact set of geometric primitives transmitted to the operator through the hydroacoustic communication channel with the AUV. Based on the received information, incoming telemetry from the AUV, and a reference three-dimensional model of the object, the graphical interface visualizes the scanned scene, allowing the operator to assess the recognition accuracy. Full-scale experimental tests of the method were conducted using a hydroacoustic modem manufactured by the Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IMTP FEB RAS) and an onboard computer NVIDIA Jetson TX2. The information packet transmitted within 1 minute contained the object type, its position, a defect map, and the coordinates of the characteristic features, with a data volume three orders of magnitude smaller than that required for transmitting the full point cloud of the scanned object. Based on the received information, the operator confirmed successful object identification even when up to 30% of the surface area was covered by defects. The practical significance of the proposed method lies in enabling the execution of critical missions under operator supervision in conditions of environmental uncertainty.

Autonomous unmanned underwater vehicle; multi-link manipulator; machine vision system; object identification; underwater operations; hydroacoustic communication channel; point clouds; ICP algorithm; data transmission.

Введение. Выполнение поисковых, инспекционных и технологических операций в глубинах Мирового океана на сегодняшний день невозможно без применения робототехнических комплексов. Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), оснащенные многозвенными манипуляторами (ММ) и системами технического зрения (СТЗ), имеют большой потенциал для значительного повышения эффективности, скорости и безопасности подводных миссий при одновременном снижении их стоимости [1, 2]. Для реализации этого потенциала разрабатываются системы управления и обработки сенсорной информации для автоматического выполнения подводных операций, позволяющие аппаратам самостоятельно обнаруживать объекты и осуществлять с ними манипуляционные действия [3–5].

Однако такие системы не позволяют полноценно решать сложные задачи в условиях неопределенности окружающей водной среды, когда целевые объекты часто подвержены заиливанию, биологическому обрастанию и механическим деформациям, что при-

водит к появлению дефектов на их поверхностях. Существующие системы автоматической идентификации объектов, как правило, основанные на алгоритмах ИСР, имеют существенные ограничения [6]. Их точность критически зависит от качества предварительного совмещения облаков точек отсканированного с помощью СТЗ объекта и его эталонной модели, а также наличия выбросов, вызванных шумами или посторонними объектами [7]. В работах [8, 9] предложены алгоритмы идентификации объектов с дефектами, однако их применение лишь частично решает проблему, так как форма объекта все еще может существенно отличаться от эталонной модели. Это ведет к ошибкам идентификации и делает невозможным полностью автономное выполнение АНПА ответственных операций, требующих гарантированной достоверности распознавания объекта работ и точного позиционирования рабочего инструмента бортового ММ относительно этого объекта.

Наиболее перспективным решением обозначенной проблемы являются гибридные системы, сочетающие автономность АНПА с возможностью контроля со стороны человека-оператора. Оператор, в отличие от автоматических систем, способен гарантировать достоверность идентификации, оценить степень расхождения эталонной модели с реальной формой объекта и, при необходимости, скорректировать процесс распознавания и сформировать дальнейшие целеуказания для аппарата, что особенно важно на ответственных этапах подводной миссии. В мировой практике известны успешные примеры реализации такого подхода. Один из них реализован для подводного аппарата SAUVIM [10], архитектура системы управления которого организована по трехуровневому принципу (планирование, контроль, исполнение), а оператор формирует лишь команды высокого уровня в виде последовательности целевых подзадач, после чего их детальная проработка и исполнение возлагаются на бортовую интеллектуальную систему.

Другой подход демонстрирует система TRIDENT, реализованная на базе аппарата Girona-500, где для анализа оператором подводной обстановки и формирования целеуказаний требуется всплытие аппарата для обеспечения высокоскоростного канала связи [11]. Однако рассмотренные системы разрабатывались для подводных аппаратов, имеющих возможность использования высокоскоростных каналов связи. Большинство же типовых АНПА оснащены исключительно гидроакустическим каналом, принципиальными ограничениями которого являются низкая пропускная способность и значительные задержки при передаче данных [12].

Постановка задачи. Для решения указанной проблемы в статье ставится задача разработки метода, обеспечивающего посредством низкопропускного гидроакустического канала связи информационное взаимодействие оператора с АНПА для оценки оператором качества распознавания целевых объектов с последующим формированием целеуказаний для аппарата и его бортового манипулятора.

Поскольку по гидроакустическому каналу связи невозможно передать весь объем получаемой от бортовых СТЗ сенсорной информации, в частности видеопотока или плотных облаков точек, предлагается осуществлять обработку этой информации на борту АНПА. Аппарат должен самостоятельно выполнять идентификацию целевых объектов и выделение их характерных особенностей (ХО) и дефектов, а оператору передавать только компактные результаты этой обработки данных – структурированный информационный пакет, содержащий сведения о типе объекта, его положении, наличии дефектов и ХО.

Предлагаемый метод состоит из двух взаимосвязанных этапов. На первом этапе реализуется алгоритм идентификации, основанный на модифицированном алгоритме ИСР, позволяющий точно определять положение и ориентацию объекта с дефектами путем исключения дефектных точек из процесса сопоставления с эталонной моделью. На этом же этапе определяются заранее заданные ХО объекта, по которым оператор может однозначно удостовериться в правильности идентификации. На втором этапе реализуется алгоритм формирования данных для передачи оператору, преобразующий информацию о выявленных дефектах и ХО в компактный набор параметрических геометрических примитивов, который может быть передан по низкопропускному каналу связи. На основе полученной информации, поступающей от АНПА телеметрии, а также эталонной трёхмерной модели объекта графический интерфейс должен динамически визуализи-

зировать сканируемую сцену, отображая подводную обстановку: текущее пространственное положение АНПА, целевой объект и выявленные расхождения этого объекта с эталонной моделью. Это позволит оператору визуально оценить корректность выполненной идентификации и сформировать последующие целеуказания.

Идентификация характерных особенностей и дефектов. Как отмечалось во введении, точное определение пространственного положения и ориентации подводного объекта является одним из основных требований для успешного выполнения с помощью АНПА подводных манипуляционных и инспекционных миссий. В основе известных систем идентификации целевого объекта для выполнения манипуляционных операций [13, 14] был заложен классический алгоритм ICP, который успешно справляется с задачей совмещения эталонной модели с данными, получаемыми от СТЗ, после их предварительной фильтрации и сегментации [15]. Данный подход демонстрировал высокую эффективность для объектов, находящихся в идеальном или близком к идеальному состоянию, а также высокую точность достоверности угловых и линейных смещений реального объекта относительно эталонной модели.

Однако, как подтвердили натурные эксперименты в водной среде, а также исследования других авторов [15, 16], наличие на объекте дефектов (заиливание, биологические обрастания, механические повреждения) может приводить как к ошибкам при определении положения объекта, так и к его ошибочной идентификации, когда алгоритм сопоставляет эталонное облако точек с другим, схожим по форме отсканированным объектом.

Для разработки алгоритма, лишенного вышеуказанных недостатков, предлагается находить ХО, гарантированно идентифицирующие объект, а также выявлять дефекты на его поверхности. Найденные ХО предварительно исключаются из эталонной модели. Для выполнения этого процесса целесообразно разделить алгоритм идентификации на два этапа: предварительное или «грубое» совмещение, позволяющее получить начальную оценку позиции объекта [14], и последующую «точечную» итерацию, выполняемую после удаления точек, принадлежащих ХО или дефектным областям. Обобщенная схема предлагаемого алгоритма представлена на рис. 1.



Рис. 1. Обобщенная схема алгоритма поиска характерных особенностей и дефектов

После сближения АНПА с целевым объектом бортовая СТЗ в связанной с аппаратом правой прямоугольной системе координат (СК) формирует облако, состоящее из m принадлежащих поверхности объекта точек $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$. Далее, используя известные системы идентификации объектов [13, 14], определяются вектор $\vec{p} \in R^3$ и матрица $M \in R^{3 \times 3}$, описывающие линейное смещение и поворот облака точек эталонной модели объекта относительно осей СК АНПА, необходимые для совмещения этого облака с облаком точек P .

После этапа предварительного совмещения облаков вычисляется среднеквадратичное отклонение r_{ICP} (СКО) между соответствующими точками реального и эталонного (целевого) облаков точек. Если величина СКО превышает заданный пороговый уровень $r_{ICP}^{\max}$, то это служит индикатором наличия значительных расхождений, вызванных дефектами или наличием ХО. В этом случае начинается процедура идентификации и исключения точек дефекта или особенностей, после чего происходит повторное совмещение облаков точек целевого объекта.

Таким образом, предлагаемый алгоритм поиска состоит из следующих шагов:

1. Определение области пространственного поиска. При соблюдении условия $r_{ICP} > r_{ICP}^{\max}$ на основе полученного значения СКО r_{ICP} вычисляется радиус R сферы, в которой выполняется поиск ближайших точек:

$$R = K_R \sqrt{r_{ICP}},$$

где $K_R \geq 1$ – коэффициент, задающий отклонение порогового значения радиуса R , что обеспечивает учет СКО r_{ICP} . Данный подход позволяет адаптивно задавать область поиска в зависимости от степени общего несоответствия облаков, вычисляемого согласно рассчитанному значению СКО r_{ICP} .

2. Оценка плотности эталонного облака. Рассчитывается средняя плотность d целевого облака точек для сферы полученного радиуса. Для этого для каждой точки целевого облака определяется количество ближайших точек в этом же облаке в сфере указанного радиуса R , и определяется величина $\tilde{d}$:

$$\tilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^n {}^t N_i^R}{n},$$

где n – количество точек в целевом облаке; ${}^t N_i^R$ – количество ближайших соседних точек для i -ой точки целевого облака ($i = \overline{1, n}$) в этом же облаке, рассчитываемое стандартными методами программной библиотеки PCL [17]. Тогда среднюю плотность d можно задать следующим образом:

$$d = \tilde{d} - k,$$

где k – целое положительное число, задающее возможное отклонение от величины $\tilde{d}$ и обусловленное неточностью предварительного совмещения облаков точек, а также разной плотностью совмещаемых облаков.

3. Идентификация точек-выбросов в сканированном облаке. На следующем шаге работы алгоритма для каждой точки P_j ($j = \overline{1, m}$) определяется количество ${}^r N_j^R$ ближайших точек целевого облака в сфере радиуса R . Если ${}^r N_j^R < d$, то точка P_j помечается как принадлежащая области дефекта или ХО.

4. Итеративное уточнение. Все найденные точки записываются в облако точек D и исключаются из сканированного облака. С оставшимся подмножеством точек выполняется повторное – финальное совмещение с эталонной моделью с помощью алгоритма ИСР, и определяются новый вектор $\vec{p}_d \in R^3$ и матрица $M_d \in R^{3 \times 3}$, описывающие линейное смещение и поворот облака точек модели. Если после этого совмещения значение r_{ICP} все еще превышает $r_{ICP}^{\max}$, то процедура идентификации дефектов (шаги 1-3) повторяется для дальнейшего исключения дефектов и ХО из данных.

Наглядная иллюстрация работы алгоритма для двумерного случая представлена на рис. 2. Зеленым цветом обозначены точки эталонной модели, синим – точки сканированного объекта, имеющие достаточное количество соответствий в эталонном облаке, а красным – выбросы, которые будут исключены из процедуры финального совмещения.

Важным преимуществом предложенного метода является его способность работать с облаками точек, имеющими значительные различия в плотности, что типично для подводных СТЗ, где данные часто носят разреженный и зашумленный характер.

На основе финального вектора $\vec{p}_d$ и матрицы M_d определяется СК целевого объекта, привязанная к его геометрическому центру. Это позволяет в свою очередь представить координаты дефектов и ХО в локальной СК объекта, что существенно снижает раз-

мерность передаваемых данных. Данная информация является основной для формирования целеуказаний манипулятору, так как по выделенным ХО может быть перестроена траектория движения рабочего инструмента ММ с целью выполнения операции очистки объекта [3].

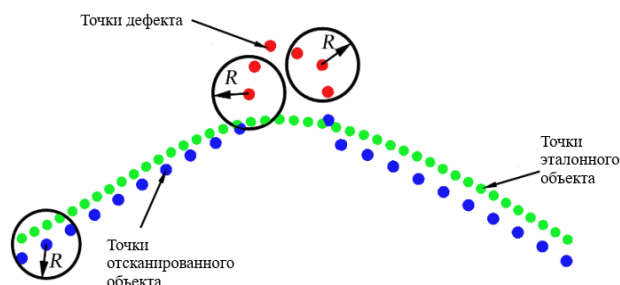


Рис. 2. Визуализация поиска точек ХО и дефекта

Формирование данных для отправки оператору. Успешная идентификация объекта и точное определение зон его дефектов и ХО, описанные в предыдущей части статьи, решают лишь первую часть общей задачи. Полученное облако D дефектов и ХО содержит плотное множество точек, которое невозможно быстро передать оператору по гидроакустическому каналу связи, пропускная способность которого в реальных условиях составляет 80–350 бит/с. Для решения этой проблемы предлагается иерархическая многоэтапная передача дополнительно преобразованных данных. На каждом следующем этапе детализация информации возрастает, а решение о запросе следующего этапа данных для конкретного дефекта и ХО оператор принимает на основе информации, полученной на предыдущем этапе. Такой подход позволяет минимизировать избыточность передаваемой информации и адаптировать процесс коммуникации под реальные условия канала связи.

Исходными данными для рассматриваемого алгоритма является облако точек D , сформированное на этапе идентификации как множество точек, исключенных из исходного облака точек объекта работ из-за их несоответствия эталонной модели. Это облако представляет собой неоднородный массив, который может содержать как единичные выбросы, так и скопления точек, соответствующие реальным физическим дефектам и ХО.

Для выделения отдельных дефектов в подмножества (рис. 3) $G_k \subset D$, $k \in [1, N_d]$, где N_d – количество дефектов и ХО, используется алгоритм Euclidean Cluster Extraction [18], который выполняет разделение исходного облака на кластеры (отдельные сегменты) на основе вычисления евклидовой нормы между парами точек, входящих в множество D .

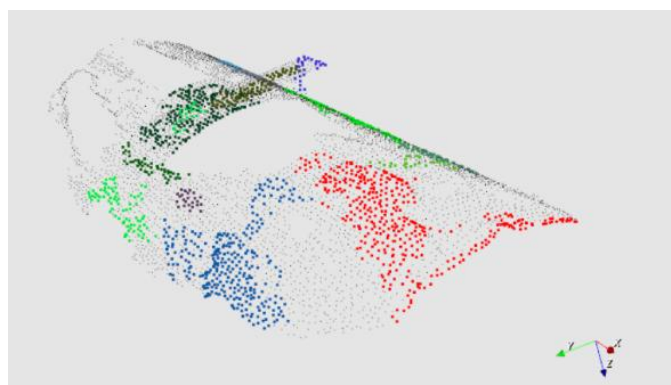


Рис. 3. Сегментированные облака точек дефектов и ХО

Для того, чтобы определить положение дефектов и ХО относительно СК объекта для каждого G_k определяются центроиды (центр масс) $X_{C_k} = [x_{C_k}, y_{C_k}, z_{C_k}]^T$:

$$\bar{X}_{C_k} = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^N g_h^k,$$

где $g_h^k \in G_k$ – h -я точка k -го дефекта или ХО, $h \in [1, N]$, N – количество точек k -го дефекта или ХО.

Помимо центроидов дефектов на этом этапе также необходима информация об его объеме. Вычисление объема отдельного дефекта и ХО может осуществляться двумя способами в зависимости от требуемой точности и от вычислительных возможностей бортового компьютера. Первый способ – вычисление объема геометрического примитива, аппроксимирующего поверхность дефекта. Например, может вычисляться объем ограничивающего эллипсоида или объем ограничивающего параллелепипеда (ОП) дефекта. Во втором случае строится воксельная сетка облака точек дефекта и находится сумма объемов всех вокселей.

Для построения аппроксимирующего геометрического примитива или воксельной сетки k -го дефекта необходимо определить его ориентацию относительно СК объекта. Для этого сначала вычисляется ковариационная матрица C_k :

$$C_k = \frac{1}{N-1} \sum_{h=1}^N (\bar{p}_h^k - \bar{X}_{C_k})(\bar{p}_h^k - \bar{X}_{C_k})^T.$$

Зная ковариационную матрицу каждого дефекта, можно определить собственные векторы $\bar{v}_{maj_k} = [v_{maj_k}^x, v_{maj_k}^y, v_{maj_k}^z]^T$, $\bar{v}_{mid_k} = [v_{mid_k}^x, v_{mid_k}^y, v_{mid_k}^z]^T$, $\bar{v}_{min_k} = [v_{min_k}^x, v_{min_k}^y, v_{min_k}^z]^T$ облака точек G_k , которые задают главные оси облака точек дефекта и, следовательно, его ориентацию (поворот) относительно СК объекта. Для нахождения собственных векторов используется алгоритм, в основе которого лежит разложение Шура [19]. Матрица поворота дефекта относительно СК объекта будет иметь следующий вид:

$$R_k = \begin{bmatrix} v_{maj_k}^x & v_{mid_k}^x & v_{min_k}^x \\ v_{maj_k}^y & v_{mid_k}^y & v_{min_k}^y \\ v_{maj_k}^z & v_{mid_k}^z & v_{min_k}^z \end{bmatrix}.$$

Матрица R_k используется для выравнивания облака точек дефекта с СК объекта. Перенесенные точки задаются следующим выражением:

$$\tilde{g}_h^k = R_k \bar{g}_h^k - \bar{X}_{C_k}.$$

Далее определяются наибольшие $\tilde{g}_{\max}^k = [\tilde{g}_{\max}^{x_k}, \tilde{g}_{\max}^{y_k}, \tilde{g}_{\max}^{z_k}]^T$ и наименьшие $\tilde{g}_{\min}^k = [\tilde{g}_{\min}^{x_k}, \tilde{g}_{\min}^{y_k}, \tilde{g}_{\min}^{z_k}]^T$ координаты точек облака дефекта по трём осям. Разница векторов $\tilde{g}_{\max}^k - \tilde{g}_{\min}^k$ позволяет определить линейные размеры w, d, h ОП по трём осям или длины осей аппроксимирующего эллипсоида и, следовательно, объем выбранного аппроксимирующего примитива.

В случае, когда строится воксельная сетка дефекта, определяется количество вокселей вдоль каждой из координатных осей:

$$n_v^{a_k} = \frac{\tilde{g}_{\max}^{a_k} - \tilde{g}_{\min}^{a_k}}{s_v^{a_k}},$$

где $a_k \in [x_k, y_k, z_k]$, $n_v^{a_k}$ – количество вокселей вдоль оси a_k , $s_v^{a_k}$ – размерность вокселя вдоль оси a_k , которая задаётся оператором (рассчитывается исходя из плотности облака точек).

После этого строится предварительная воксельная сетка B_k , из которой затем удаляются воксели, в которые попадает менее чем ρ_k точек. Величина ρ_k задаётся оператором (рассчитывается исходя из плотности облака точек). Для определения «пустых» вокселей используется алгоритм поиска по kd-tree [16]. В результате работы алгоритма поиска в сетке k -го дефекта остается b_k – вокселей, тогда объем k -го дефекта будет задаваться следующим выражением:

$$V_k = b_k s_v^{x_k} s_v^{y_k} s_v^{z_k}.$$

После расчета координат центроида дефектов и их объемов формируются пакеты данных для осуществления первого цикла передачи данных оператору АНПА (табл. 1). Центроиды, представленные изначально в формате float (4 Байта) в метрах, для передачи данных они запаковываются в 2 Байта, где 4 бита отводится под целую часть числа, 11 бит под дробную часть и 1 бит – под знак.

Таблица 1

Структура пакетов данных первого цикла передачи данных

Данные	x_{C_k}	y_{C_k}	z_{C_k}	V
Размер, байт	2	2	2	2

Формируемые на первом этапе данные необходимо передать в полном объеме, исключая потерю пакетов, так как они несут ключевую информацию о результатах идентификации, на основании которой будет выполняться дальнейшее уточнение. Для оператора эта информации интерпретируется как карта дефектов и ХО на объекте с информацией о их объемах и началом СК для каждого из них (рис. 4).

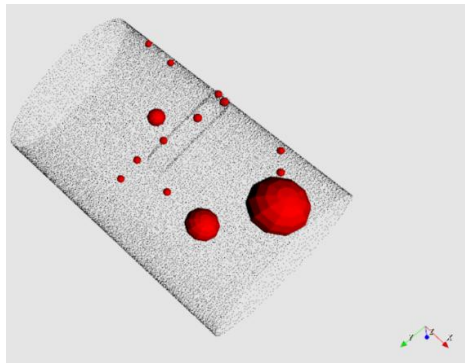


Рис. 4. Карта дефектов и ХО

На втором цикле передачи данных пакеты включают в себя следующую информацию: два вектора, задающих ориентацию облака точек дефекта, причем векторы задаются сонаправленными с $\vec{v}_{maj_k}$ и $\vec{v}_{min_k}$, а их длина равняется размерам w и h ОП дефекта; линейный размер ОП дефекта в направлении вектора $\vec{v}_{min_k}$, перпендикулярного первым двум (табл. 2).

Таблица 2

Структура пакетов данных второго цикла передачи данных

Данные	$v_{maj_k}^x w$	$v_{maj_k}^y w$	$v_{maj_k}^z w$	$v_{min_k}^x h$	$v_{min_k}^y h$	$v_{min_k}^z h$	d
Размер, байт	1	1	1	1	1	1	1

В отличие от первого этапа, второй этап допускает потерю пакетов, которая может привести к отсутствию информации о нескольких дефектах и ХО. В этом случае оператор самостоятельно принимает решение о запросе информации о конкретном дефекте и ХО, ориентируясь на карту, полученную на предыдущем этапе. Полученная информация дополняет карту объекта путём отображения ОП (рис. 5). При этом полученные векторы необходимы для определения СК каждого дефекта и ХО, что требуется на следующем этапе.

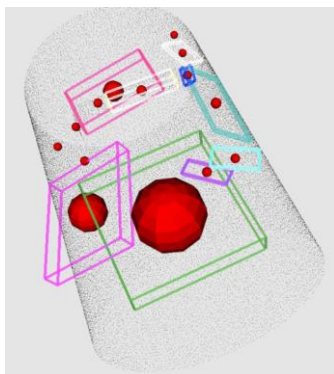


Рис. 5. Карта дефектов с ОБВ

На третьем цикле передачи данных передается воксельная сетка B_k облака точек дефекта и ХО. Поскольку ориентация отдельных вокселей задаётся векторами, переданными на втором цикле, требуется передать только координаты их центров (табл. 3). Эти координаты задаются относительно центроида облака точек:

$$\vec{\beta}_m^k = \vec{\beta}_m^k - \vec{X}_{C_k},$$

где $\vec{\beta}_m^k$ – координаты центра вокселя в СК объекта ($m = \overline{1, b_k}$), $\vec{\beta}_m^k = [x_{\vec{\beta}_m^k}, y_{\vec{\beta}_m^k}, z_{\vec{\beta}_m^k}]^T$ – смещение центра вокселя относительно центроида облака точек k -го дефекта и ХО.

Таблица 3

Структура пакетов данных третьего цикла передачи данных

Данные	$x_{\vec{\beta}_k}$	$y_{\vec{\beta}_k}$	$z_{\vec{\beta}_k}$
Размер, байт	1	1	1

Третий этап является финальным циклом передачи информации о дефектах и ХО и позволяет в полном объеме оценить их характер. Полученная информация дополняет карту воксельной сеткой, которая в достаточном виде отображает форму объекта (рис. 6).

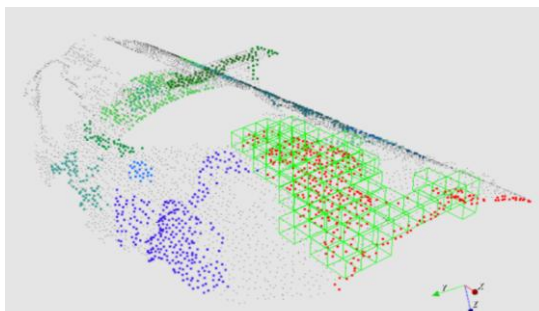


Рис. 6. Воксельная сетка ХО и дефектов

Всю полученную информацию предлагается визуализировать с помощью специализированного графического интерфейса. На основе этой информации, эталонной трёхмерной модели объекта, а также поступающей от АНПА телеметрии, графический интерфейс отображает подводную обстановку: положение АНПА, целевой объект относительно аппарата, его пространственная ориентация, а также выявленные ХО и отклонения от эталонной модели (рис. 7). Такая визуализация позволяет оператору наглядно оценить достоверность выполненной идентификации и принять решение о дальнейших действиях.

На основе полученной информации оператор может спланировать последующие целеуказания, в частности сформировать траекторию движения рабочего инструмента ММ для проецирования на поверхность объекта. Благодаря тому, что у оператора есть информация не только о геометрии объекта, но и его дефектах и ХО, формируемая траектория может строиться комбинированно: на участках дефектов и заиливания – по эталонной модели объекта (для выполнения очистки), а на участках ХО – по реальной отсканированной поверхности. При необходимости оператор также имеет возможность скорректировать предварительное совмещение облаков точек, выполненное автоматическим алгоритмом ICP. Задавая необходимый угол смещения или сдвиг вручную, он может повысить точность совмещения в случаях, когда оно выполнено неточно из-за попадания алгоритма ICP в локальный минимум.

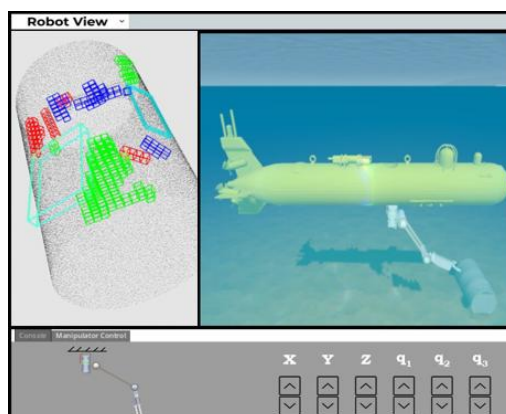


Рис. 7. Интерфейс оператора

Таким образом, предложенный алгоритм обеспечивает не только идентификацию объекта, подверженного заиливанию и обрастанию, но и предоставляет оператору достаточную информацию для принятия решений и формирования последующих целеуказаний.

Результаты. Для проверки работоспособности и особенностей функционирования предложенного метода были проведены экспериментальные исследования (в том числе и в реальных условиях), в рамках которых выполнялись обнаружение и идентификация подводного объекта с дефектами, а также формирование и передача оператору данных, достаточных для подтверждения достоверности идентификации.

Для проведения экспериментов выполняются следующие этапы:

1. В качестве типового подводного объекта работ был выбран участок трубопровода (рис. 8). Искомая характерная особенность (ХО) – анодное кольцо. Для оценки работоспособности алгоритма было выбрано три сценария: объект правильной формы, имеющий только анодное кольцо (рис. 9,а) – целевой объект; объект, не имеющий искомым характерных особенностей, но содержащий дефекты (рис. 9,б) – ложный объект; объект правильной формы, имеющий анодное кольцо и дополнительные элементы на поверхности (рис. 9,в) – целевой объект с усложняющими факторами.

2. Предложенный метод был программно реализован на базе одноплатного бортового компьютера NVIDIA Jetson TX2.

3. Проводилось сравнительное моделирование работы метода со стандартными подходами информационного взаимодействия.

4. Для передачи сформированных пакетов данных проводился эксперимент в реальных морских условиях с использованием гидроакустической системы связи производства ИПМТ ДВО РАН [20].

5. Полученные данные графически интерпретировались с помощью интерфейсе оператора.

6. Выполнялась оценка возможности оператора оценивать корректность идентификации и формировать последующие целеуказания. Оператор должен был определить верные сценарии из трех, описанных выше.

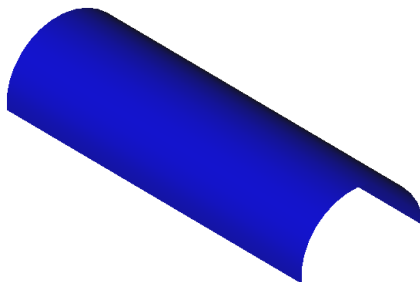


Рис. 8. Эталонный объект

Для каждого из сценариев на вычислителе NVIDIA Jetson TX2 выполнялась идентификация объекта путем совмещения облаков точек эталонного объекта с облаками точек, имитирующих реальный объект. Далее определялись ХО и дефекты, выполнялась их сегментация, и формировались пакеты данных. Средний объем передаваемой информации составил около 2кБ, в то время как необработанные данные (облака точек всей модели или только ХО) имели объем порядка 70-200 кБ. Время обработки всех данных на вычислителе занимало около 10 с (табл. 4).

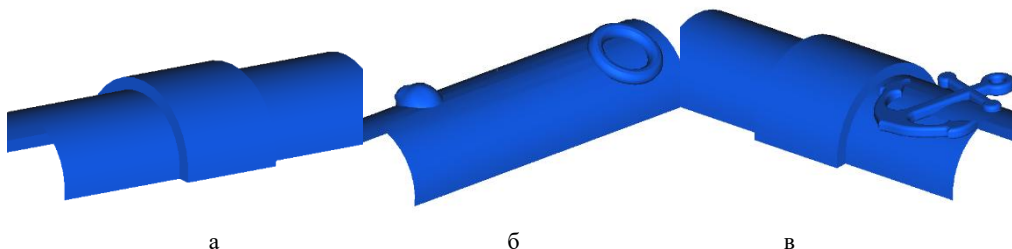


Рис. 9. Модели реальных объектов: а – объект с анодом; б – объект без анода, имеющий неизвестные объекты на поверхности; в – объект с анодом, имеющий неизвестные объекты на поверхности

Для анализа и оценки эффективности предложенного метода (далее «Авторский») проводилось сравнительное моделирование с двумя подходами (табл. 4): «Базовый» – передаются «сырые» данные в виде облака точек; «Дефекты» – передаются облака точек только дефекта и ХО. При анализе времени передачи данных принималась скорость канала связи 300 бит/с. Таким образом для передачи данных «Базовым» подходом (объем облака точек – ~200 кБ) понадобится ~91 минута; подходом «Дефекты» (объем облака точек дефектов и ХО – ~62 кБ) потребует ~30 мин. Предложенный метод (с учетом трехэтапной генерации Intel HEX файлов размером 419 Б, 391 Б и 1326 Б соответственно) суммарно потребует ~1 мин.

Предлагаемый в данный работе метод показал при моделировании следующие результаты: все данные, полученные на трехэтапной генерации файлов, содержат сведения о дефектах и их потери могут привести к необходимости повторной отправки. Однако

при успешной передаче данных первого этапа (содержащие сведения о карте дефектов и ХО), последующие данные (второго и третьего цикла), приходящие с ошибкой, не влекут за собой «ошибки» в понимании оператором состояния объекта. Результаты сравнительного анализа представлены в табл. 4.

Таблица 4

Сравнительный анализ

	«Базовый»	«Дефекты»	«Авторский»
Время обработки данных	~0 с	~13 с	~14 с
Объем передаваемых данных	~200 кБ	~62 кБ	~2136 Б (2 кБ)
Ошибка идентификации положения	Отсутствует	< 2 см	< 3 см
Время передачи	~91 мин	~30 мин	~1 мин

Для оценки работоспособности системы в акватории использовался режим передачи данных со скоростью 250 бит/с [20]. Преамбульная часть сигнала формировалась на основе псевдослучайной последовательности длительностью 4 мс с центральной частотой излучения 12 кГц. Передача данных осуществлялась формированием многочастотного сигнала на 16-ти частотных каналах в полосе 6375 Гц с последующим усилением в классе D. Морские тесты проводились в мелководной акватории с глубинами до 12 м на дистанциях до 515 м. Гидрологические особенности в данной акватории характеризовались придонным распространением звука со значительным поглощением энергии сигнала в илистом донном грунте.

Для оценки вероятностей ошибок при передаче данных были сформированы блоки данных длиной не более 32 байт. По выполненной серии тестов по передаче данных (584 байт на один этап) на дистанции 515 м в статическом положении антенн получены вероятности ошибки на бит от 10^{-2} до 10^{-3} .

Вся полученная информация в режиме реального времени отображалась на графическом интерфейсе оператора (рис. 10), и в случае необходимости оператор мог дополнительно запросить потерянный пакет данных.

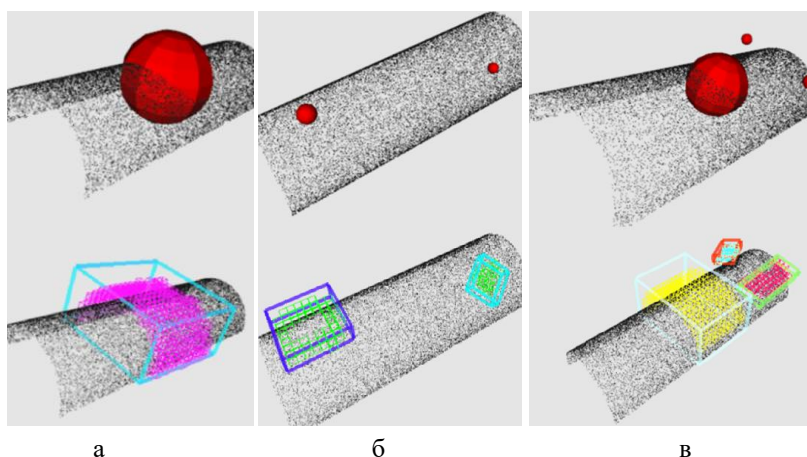


Рис. 10. Визуализация полученных данных: а – первый сценарий; б – второй сценарий; в – третий сценарий

Как видно из визуализации результатов:

♦ Первый сценарий (рис. 10,а) – на карте характерных особенностей четко идентифицируется искомый элемент (анодное кольцо), дополнительные элементы отсутствуют. При анализе полученной воксельной сетки оператор может в полной мере убедиться в достоверности идентификации и сформировать дальнейшие целеуказания для выполнения манипуляционных операций.

♦ Второй сценарий (рис. 10,б) – на карте отсутствует искомый элемент, при этом полученная воксельная сетка подтверждает наличие посторонних объектов на поверхности. Данная информация может быть использована оператором для принятия решения о необходимости выполнения очистки поверхности перед проведением целевых операций.

♦ Третий сценарий (рис. 10,в) – карта отображает наличие как искомого анодного кольца, так и посторонних объектов. Детальная воксельная сетка наглядно подтверждает присутствие целевого элемента и дополнительных объектов на поверхности. На основе этой информации оператор может самостоятельно сформировать последовательность целеуказаний: выполнить очистку поверхности от посторонних объектов, а также произвести замер катодного потенциала в области анодного кольца.

Как показал эксперимент, данных, формируемых разработанным методом, достаточно для подтверждения оператором достоверности идентификации объекта, а также для формирования последующих целеуказаний. Время передачи информационного пакета от бортового вычислителя АНПА до поста оператора составило около 1 минуты, что является приемлемым временем, в течение которого аппарат может гарантированно находиться в режиме динамического позиционирования (зависания) вблизи объекта работ [21]. Предоставляемая информация позволяет оператору не только удостовериться в правильности распознавания целевого объекта, но и принять обоснованное решение о необходимости дополнительных операций (например, очистки поверхности), а также сформировать траекторию для дальнейших манипуляций с учетом выявленных особенностей и дефектов объекта.

Заключение. Резюмируя изложенное, можно сделать следующие выводы.

Предложенные в работе метод информационного взаимодействия оператора и АНПА для идентификации целевых объектов позволяет выполнять с помощью АНПА инспекционные и манипуляционные операции под контролем оператора в условиях ограниченной пропускной способностью гидроакустического канала связи. Предложенный метод обладает невысокой вычислительной сложностью, что позволяет реализовать его на бортовом вычислителе СТЗ или АНПА.

В отличие от известных работ [1–4, 11, 14], в которых системы рассчитаны для подводных аппаратов, имеющих возможность использования высокоскоростных каналов связи, в данной работе предложен метод для типовых АНПА, оснащенных исключительно гидроакустическим каналом, принципиальными ограничениями которого являются низкая пропускная способность и значительные задержки при передаче данных. Данный метод позволяет передавать оператору структурированный информационный пакет, содержащий данные о типе объекта, его пространственном положении, карте дефектов и ключевых ХО, при объеме данных, на три порядка меньшем по сравнению с передачей полного облака точек сканируемого объекта.

Экспериментальные исследования, проведенные в натурных условиях с использованием гидроакустической системы связи на дистанции 515 м, подтвердили работоспособность и высокую эффективность предложенного метода. Время передачи информационного пакета составило около 1 минуты, что является приемлемым для удержания аппарата в режиме зависания. Экспериментально подтверждено, что предоставляемой информации достаточно для однозначного подтверждения оператором достоверности идентификации объекта и формирования дальнейших целеуказаний для АНПА и его бортового ММ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10038, <https://rscf.ru/project/23-71-10038/>.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Palomeras N, Peñalver A., Massot-Campos M., Negre P.L., Fernández J.J., Rídao P., Oliver-Codina G. I-AUV docking and panel intervention at sea // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16, No. 10. – 1673 p.
2. Rídao P., Carreras M., Ribas D., Sanz P.J., Oliver G. Intervention AUVs: the next challenge // *Annual Reviews in Control*. – 2015. – Vol. 40. – P. 227-241.
3. Konoplin A. Krasavin N., Yurmanov A., Piatavin P., Vasilenko R., Panchuk M. Development of a control system for underwater vehicles with multilink manipulators performing contact manipulation operations // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 12, No. 7. – 1126 p.

4. Панчук М.О., Юрманов А.П., Коноплин А.Ю. Система автоматической инспекции проблемных участков протяженных объектов с помощью АНПА // Подводные исследования и робототехника. – 2025. – № 2 (52). – С. 41-52.
5. Jaber N., Wehbe B., Kirchner F. 3D-DUO: 3D detection of underwater objects in low-resolution multibeam echosounder maps // Ocean Engineering. – 2025. – Vol. 331. – P. 121254.
6. Besl P., McKay H. A method for registration of 3-D shapes // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1992. – Vol. 14, No. 2. – P. 239-256.
7. Tam G.K.L., Cheng Z.Q., Lai Y.K., Langbein F.C., Liu Y., Marshall D., Martin R.R., Sun X.F., Rosin P.L. Registration of 3D point clouds and meshes: A survey from rigid to nonrigid // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2012. – Vol. 19, No. 7. – P. 1199-1217.
8. Lv C., Lin W., Zhao B. KSS-ICP: Point Cloud Registration Based on Kendall Shape Space // IEEE Transactions on Image Processing. – 2023. – Vol. 32. – P. 1681-1693.
9. Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С. Управление манипуляторами при выполнении различных технологических операций. – М.: Наука, 2018. – 254 с.
10. Marani G., Yuh J. The SAUVIM Underwater Vehicle-Manipulator System // Introduction to Autonomous Manipulation: Case Study with an Underwater Robot, SAUVIM. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. – P. 79-105.
11. López-Barajas S.S., Solis A., Marín-Prades R., Sanz P.J. Towards Autonomous Coordination of Two I-AUVs in Submarine Pipeline Assembly // Journal of Marine Science and Engineering. – 2025. – Vol. 13, No. 8. – 1490 p.
12. Денисов В.Е. Пропускная способность гидроакустического канала связи // Russian Technological Journal. – 2023. – Т. 11, № 1. – С. 31-40.
13. Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu., Shuvalov B.V. Technology for implementation of manipulation operations with different underwater objects by AUV // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2019. – P. 1-5.
14. Konoplin A., Yurmanov A., Krasavin N., Piatavin P. Development of a control system for multilink manipulators on unmanned underwater vehicles dynamically positioned over seafloor objects // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, No. 3. – P. 1666.
15. Hegedűs-Kuti J., Szőlősi J., Varga D., Abonyi J., Ando M., Ruppert T. 3D scanner-based identification of welding defects – clustering the results of point cloud alignment // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 5. – P. 2503.
16. Konoplin A., Yurmanov A., Krasavin N., Piatavin P., Panchuk M., Vasilenko R. System for identifying target objects to perform manipulative operations by unmanned underwater vehicles // 2022 International Conference on Ocean Studies (ICOS). – IEEE, 2022. – P. 55-59.
17. How to use a KdTree to search. – URL: https://pcl.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/kdtree_search.html (дата обращения: 01.03.2026).
18. Nguyen A., Cano A. M., Edahiro M., Kato S. Fast Euclidean cluster extraction using GPUs // Journal of Robotics and Mechatronics. – 2020. – Vol. 32, No. 3. – P. 548-560.
19. Van Loan C. F., Golub G. Matrix computations. – Third Ed. – Johns Hopkins University Press, 1996. – Vol. 1. – 723 p.
20. Родионов А.Ю. Цифровые системы связи и навигации в нестационарных гидроакустических средах: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.08.06. ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет». – Владивосток, 2022. – 352 с.
21. Коноплин А.Ю., Красавин Н.А., Василенко Р.П. Система стабилизации АНПА, оснащаемого дополнительным движителем для компенсации динамических воздействий со стороны многозвездного манипулятора // Подводные исследования и робототехника. – 2023. – № 3. – С. 20-29.

REFERENCES

1. Palomeras N. Peñalver A., Massot-Campos M., Negre P.L., Fernández J.J., Ridao P., Oliver-Codina G. I-AUV docking and panel intervention at sea, *Sensors*, 2016, Vol. 16, No. 10, 1673 p.
2. Ridao P., Carreras M., Ribas D., Sanz P.J., Oliver G. Intervention AUVs: the next challenge, *Annual Reviews in Control*, 2015, Vol. 40, pp. 227-241.
3. Konoplin A. Krasavin N., Yurmanov A., Piatavin P., Vasilenko R., Panchuk M. Development of a control system for underwater vehicles with multilink manipulators performing contact manipulation operations, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, Vol. 12, No. 7, 1126 p.
4. Panchuk M.O., Yurmanov A.P., Konoplin A.Yu. Sistema avtomaticheskoy inspektsii problemnykh uchastkov protyazhennykh ob"ektov s pomoshch'yu ANPA [Automatic inspection system for problematic sections of extended objects using AUV], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Research and Robotics], 2025, No. 2 (52), pp. 41-52.

5. Jaber N., Wehbe B., Kirchner F. 3D-DUO: 3D detection of underwater objects in low-resolution multibeam echosounder maps, *Ocean Engineering*, 2025, Vol. 331, pp. 121254.
6. Besl P., McKay H. A method for registration of 3-D shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, Vol. 14, No. 2, pp. 239-256.
7. Tam G.K.L., Cheng Z.Q., Lai Y.K., Langbein F.C., Liu Y., Marshall D., Martin R.R., Sun X.F., Rosin P.L. Registration of 3D point clouds and meshes: A survey from rigid to nonrigid, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2012, Vol. 19, No. 7, pp. 1199-1217.
8. Lv C., Lin W., Zhao B. KSS-ICP: Point Cloud Registration Based on Kendall Shape Space, *IEEE Transactions on Image Processing*, 2023, Vol. 32, pp. 1681-1693.
9. Filaretov V.F., Zuev A.V., Gubankov A.S. Upravlenie manipulyatorami pri vypolnenii razlichnykh tekhnologicheskikh operatsiy [Control of manipulators when performing various technological operations]. Moscow: Nauka, 2018, 254 p.
10. Marani G., Yuh J. The SAUVIM Underwater Vehicle-Manipulator System, *Introduction to Autonomous Manipulation: Case Study with an Underwater Robot, SAUVIM*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014, pp. 79-105.
11. López-Barajas S.S., Solis A., Marín-Prades R., Sanz P.J. Towards Autonomous Coordination of Two I-AUVs in Submarine Pipeline Assembly, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025, Vol. 13, No. 8, 1490 p.
12. Denisov V.E. Propusknaya sposobnost' gidroakusticheskogo kanala svyazi [Bandwidth of hydroacoustic communication channel], *Russian Technological Journal*, 2023, Vol. 11, No. 1, pp. 31-40.
13. Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu., Shuvalov B.V. Technology for implementation of manipulation operations with different underwater objects by AUV, *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. IEEE, 2019, pp. 1-5.
14. Konoplin A., Yurmanov A., Krasavin N., Piatavin P. Development of a control system for multilink manipulators on unmanned underwater vehicles dynamically positioned over seafloor objects, *Applied Sciences*, 2022, Vol. 12, No. 3, pp. 1666.
15. Hegedüs-Kuti J., Szölösi J., Varga D., Abonyi J., Ando M., Ruppert T. 3D scanner-based identification of welding defects – clustering the results of point cloud alignment, *Sensors*, 2023, Vol. 23, No. 5, pp. 2503.
16. Konoplin A., Yurmanov A., Krasavin N., Piatavin P., Panchuk M., Vasilenko R. System for identifying target objects to perform manipulative operations by unmanned underwater vehicles, *2022 International Conference on Ocean Studies (ICOS)*. IEEE, 2022, pp. 55-59.
17. How to use a KdTree to search. Available at: https://pcl.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/kdtree_search.html (accessed 01 March 2026).
18. Nguyen A., Cano A. M., Edahiro M., Kato S. Fast Euclidean cluster extraction using GPUs, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2020, Vol. 32, No. 3, pp. 548-560.
19. Van Loan C. F., Golub G. Matrix computations. Third Ed. Johns Hopkins University Press, 1996, Vol. 1, 723 p.
20. Rodionov A.Yu. TSifrovye sistemy svyazi i navigatsii v nestatsionarnykh gidroakusticheskikh sredakh: diss. ... d-ra tekhn. nauk: 05.08.06. FGAOU VO «Dal'nevostochnyy federal'nyy universitet» [Digital communication and navigation systems in non-stationary hydroacoustic environments: dr. of eng. sc. diss.: 05.08.06. Far Eastern Federal University]. Vladivostok, 2022, 352 p.
21. Konoplin A.Yu., Krasavin N.A., Vasilenko R.P. Sistema stabilizatsii ANPA, osnashchaemogo dopolnitel'nyim dvizhitelem dlya kompensatsii dinamicheskikh vozdeystviy so storony mnogozvennogo manipulyatora [Stabilization system of an AUV equipped with an additional thruster for compensation of dynamic disturbances from a multilink manipulator], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Exploration and Robotics], 2023, No. 3, pp. 20-29.

Коноплин Александр Юрьевич – Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: kayur-prim@mail.ru; г. Владивосток, Россия; тел.: +79244298396; директор; д.т.н.

Юрманов Александр Павлович – Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: yurmanov_a@mail.ru; г. Владивосток, Россия; тел.: +79146786060; научный сотрудник.

Родионов Александр Юрьевич – Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: deodar1618@yandex.ru; г. Владивосток, Россия; тел.: +79243331618; д.т.н.

Василенко Роман Павлович – Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: vrp261200@mail.ru; г. Владивосток, Россия; тел.: +79020644321; м.н.с.

Панчук Максим Олегович – Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: my_panchuk@mail.ru; г. Владивосток, Россия; тел.: +79996170369; м.н.с.

Konoplin Aleksandr Yurievich – Academician M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: kayur-prim@mail.ru; Vladivostok, Russia; phone: +79244298396; director; dr. of eng. sc.

Yurmanov Aleksandr Pavlovich – Academician M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: yurmanov_a@mail.ru; Vladivostok, Russia; phone: +79146786060; research scientist.

Rodionov Aleksandr Yurievich – Academician M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: deodar1618@yandex.ru; Vladivostok, Russia; phone: +79243331618; dr. of eng. sc.

Vasilenko Roman Pavlovich – Academician M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: vrp261200@mail.ru; Vladivostok, Russia; phone: +79020644321; junior research scientist.

Panchuk Maksim Olegovich – Academician M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: my_panchuk@mail.ru; Vladivostok, Russia; phone: +79996170369; junior research scientist.

УДК 007.52:629.3.05

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-135-150

В.А. Костюков

МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ РОБОТОВ В СЛОЖНЫХ КОНФЛИКТНЫХ СРЕДАХ С ПОЛИГОНАЛЬНЫМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ

При разработке алгоритмов планирования путей роботов в режиме реального времени возникает проблема ограничения быстродействия соответствующих классических алгоритмов. В настоящей работе рассматривается метод планирования перемещений робота в двумерной сложной конфликтной среде. В отношении планирования в сложных средах предложен гибридный алгоритм планирования, базирующийся на сочетании и синтезе классического алгоритма клеточной декомпозиции и недавно предложенного алгоритма на базе характеристического графа видимости. Этот алгоритм подразумевает предварительный анализ степени сложности сцены с препятствиями, по результатам которого выбирается один из двух указанных частных алгоритмов. Показывается, что таким образом удастся в значительной степени преодолеть ограничения обоих этих алгоритмов. В компактном виде описан метод уклонения от источников возмущения, основанный на аппарате характеристических вероятностных функций, и показана его взаимосвязь с методами планирования в сложных средах при решении соответствующих задач глобальной оптимизации вероятности успешного прохождения целевой траектории. В рамках развиваемого подхода рассмотрен вопрос о взаимосвязи вероятности успешного прохождения пути в поле источников и соответствующей функции риска. Для решения задач глобального планирования перемещений роботов в сложной конфликтной среде на первом этапе предлагается использовать указанный гибридный алгоритм - для построения семейства начальных кривых в соответствующих допустимых коридорах движения без учета источников. Затем решается семейство задач локальной оптимизации в пределах допустимых коридоров движения с учетом источников. Далее выбирается траектория с максимальным значением вероятности успешного прохождения либо нормированной функции безопасного движения. Приводятся примеры численной реализации предлагаемого метода, подтверждающие его эффективность.

Планирование пути; метод клеточной декомпозиции; характеристический граф видимости; вычислительная сложность алгоритма; задача уклонения от источников; характеристическая вероятностная функция; целевой вероятностный функционал.

V.A. Kostyukov

A METHOD FOR PLANNING ROBOTIC MOVEMENTS IN COMPLEX CONFLICT ENVIRONMENTS WITH POLYGONAL OBSTACLES

When developing algorithms for real-time robot path planning, the problem of performance limitations of the corresponding classical algorithms arises. This paper considers a method for planning robot movements in a two-dimensional complex conflict environment. For planning in complex environments, a hybrid planning algorithm is proposed, based on a combination and synthesis of the classical cellular decomposition algorithm and a recently proposed algorithm based on the characteristic visibility graph. This algorithm involves a preliminary analysis of the complexity of the obstacle scene, based on the results of which one of the two specified particular algorithms is selected. It is shown that this approach can significantly overcome the limitations of both of these algorithms. A disturbance avoidance method based on the apparatus of characteristic probability functions is described in a compact form, and its relationship with planning methods in complex environments is demonstrated when solving corresponding problems of global optimization of the probability of successful completion of a target trajectory. The developed approach examines the relationship between the probability of successful path completion in a source field and the corresponding risk function. To solve global robot motion planning problems in complex conflict environments, the proposed hybrid algorithm is first proposed for constructing a family of initial curves within the appropriate feasible motion corridors, ignoring sources. A family of local optimization problems is then solved within the feasible motion corridors, taking sources into account. Next, the trajectory with the maximum probability of successful completion or the normalized safe motion function is selected.

Path planning; cellular decomposition method; characteristic visibility graph; algorithm computational complexity; source avoidance problem; characteristic probability function; probability objective functional.

Введение. Актуальность исследований в области планирования перемещений роботов обусловлена возрастающими областями применения автономных подвижных платформ и их групп, включая конфликтные среды с препятствиями и источниками возмущений разной природы. Такими источниками могут быть области радиационного или химического заражения, тепловые поля и пр. Расширение сферы применения подвижных объектов требует совершенствования методов планирования движений, предназначенных для указанных сред.

Целесообразно рассматривать две взаимосвязанные проблемы: построение эффективных алгоритмов планирования в средах со сложными препятствиями, и алгоритмов уклонения от источников возмущений в конфликтных средах.

Практически востребованными и одновременно наиболее сложными являются те режимы и миссии функционирования роботов и их групп, которые подразумевают движение в фиксированных коридорах и требуют решения задачи уклонения в них от источников. В этом случае целесообразно спланировать предварительную траекторию движения в этом коридоре с учетом обычных препятствий, после чего произвести уклонение в сторону более безопасной траектории с учетом источников.

При решении задачи планирования движения в сложных средах наиболее распространены методы на базе клеточной декомпозиции [1–3]. Однако алгоритмы оптимального планирования, такие как алгоритм *Deijkstra*, обладают высокой вычислительной сложностью. Эвристические алгоритмы, например, A^* , D^* [2, 3], уменьшают вычислительную сложность, однако, могут приводить к неоптимальным траекториям.

Основной проблемой этих методов является квадратичный по числу полигонов рост сложности, что существенно ограничивает область их практического применения для решения задач планирования в условиях препятствий сложных форм.

В то же время для анализа движения в конфликтных областях также используется, как правило, метод декомпозиции свободной области движения на ячейки, причем вес каждой из них определяется эвристически по параметрам источников.

В работе [4] представлен метод планирования скрытой от наблюдателей траектории в стационарной среде. Предложенный метод вычисляет для каждой ячейки среды ее вес, учитывающий расстояние до объекта, наличие препятствий и риск быть обнаруженным

наблюдателями. Однако, метод [4] базируется на эвристических понятиях риска и скрытности пути, которые не позволяют судить, например, о вероятности достижения целевой точки без обнаружения наблюдателями.

В работе [5] в среде выделяются области с повышенным риском столкновения с препятствиями. Для учета таких областей в функцию стоимости вводится дополнительная компонента, учитывающая вероятность коллизии. Данный прием применяется как для статических областей, так и динамических препятствий. Как и в работе [4], в результате риск столкновения пересчитывается в стоимость движения через ячейку.

В работах [6–8] для оценки риска возникновения коллизии используются функции, базирующиеся на потенциальных полях. В работе [6] с помощью данной функции формируется область коллизии движущегося автомобильного транспорта, имеющая максимум в окрестности расположения препятствия, и быстро убывающая за его пределами. Данная функция используется для запуска алгоритма выполнения таких маневров, как перестроение из полосы в полосу, обгон. В статье [7], как и в [6], движущиеся автомобили определяют область риска коллизий, которая формирует соответствующее потенциальное поле. Каждому автомобилю ставятся в соответствие четыре точечных источника потенциальных полей, что позволяет повысить безопасность выполнения маневров по сравнению с более простыми аппроксимациями формы автомобиля. В работе [8] препятствия также представляются в виде отталкивающих потенциальных полей риска. С учетом этих полей разрабатывается модифицированный алгоритм A^* , который учитывает в эвристических оценках стоимостей ячеек указанные поля.

Основным недостатком общепринятых методов планирования в конфликтных областях является отсутствие корректной, адекватной количественной оценки степени безопасности той или иной траектории, проходящей в области действия источников возмущений. Обычно оптимизируемые функционалы строятся на основе функций риска. Однако связь этих функций с вероятностью успешной реализации движения по соответствующей траектории, как правило, не рассматривается, или рассматривается не в полной мере.

Кроме того, из вышеприведенных примеров видно, что рассматриваемые области действия источников обычно ограничиваются простыми формами (круги, эллипсы, прямоугольники, кардиоиды). Однако встречающиеся на практике источники возмущений могут иметь области действия со сложными границами, например, за счет «мертвых» зон от препятствия, а также эффектов искусственного или естественного гашения или/затенения их поля. Препятствия также могут быть сложными по форме, аппроксимируемыми невыпуклыми полигонами.

В связи со сказанным разработка методов и алгоритмов планирования перемещений подвижных объектов в конфликтных средах с источниками возмущения, имеющими произвольные полигональные области действия, и произвольными полигональными препятствиями, является актуальной.

Метод характеристического графа видимости. В работах [9, 10] дается новый метод к построению траекторий перемещения подвижных объектов в двумерной сложной среде на основе подхода построения свободной области движения и соответствующего графа видимости. Основная проблема, которая решена в этих работах, заключалась в существенном снижении размерности этого графа по сравнению с классическими версиями [11, 12], а также исключении ряда эвристических допущений, касающихся прохождения целевых траекторий внутри кластеров свободной области [13, 14]. Для этого был разработан геометризованный аналитический метод построения кривой минимальной длины в двумерной среде с полигональными препятствиями на классе кусочно-ломаных траекторий.

Этот алгоритм осуществляет итерационное построение специального графа видимости, объединяющего некоторые характерные точки каждого из препятствий. Ребра этого графа строятся на основе локального алгоритма обхода каждого препятствия, находящегося на отрезке прямой видимости, проведенном между текущим положением движущегося объекта и целевой точкой. В результате получается так называемый характе-

ристический граф видимости, который для широкого класса препятствий сложных форм имеет мощность, существенно меньшую, – на один, два и более порядков, – соответствующей мощности классического графа видимости. Этим фактом обуславливается повышенное быстродействие разработанного алгоритма в поиске оптимального пути по сравнению с аналогами для большого класса сцен, содержащих сложные по форме препятствия. Блок-схема соответствующего оптимального алгоритма приведена на рис. 1.



Рис. 1. Обобщенная блок-схема точного алгоритма планирования по методу характеристического графа видимости

Предложенный в работах [9, 10] алгоритм является, в определенном смысле, обобщением известного локального алгоритма планирования, часто используемого на практике при обходе локальных препятствий наземными роботами [15, 16]. Это обобщение становится возможным, однако, только за счет построения указанного характеристического графа видимости и обоснования того факта, что оптимальный путь принадлежит всем возможным путям на этом графе.

Когда препятствия имеют сложную полигональную форму, быстродействие разработанного обобщенного алгоритма может вырасти на 1-2 порядка и более по сравнению с алгоритмами клеточной декомпозиции. С ростом сложности формы полигональных препятствий эта сравнительная эффективность значительно возрастает, поскольку в этом случае резко растет число ячеек свободной области движения n , необходимое для обеспечения аппроксимации свободной области в МКД.

На рис. 2 представлен пример построения множества $\{GTr(A, B)\}$ глобальных путей (показаны красными кривыми) на конечной стадии алгоритма планирования по методу характеристического графа видимости для сцены со сложными полигональными препятствиями разных удлинений. Результирующая кратчайшая кусочно-ломаная выделена зеленым цветом.

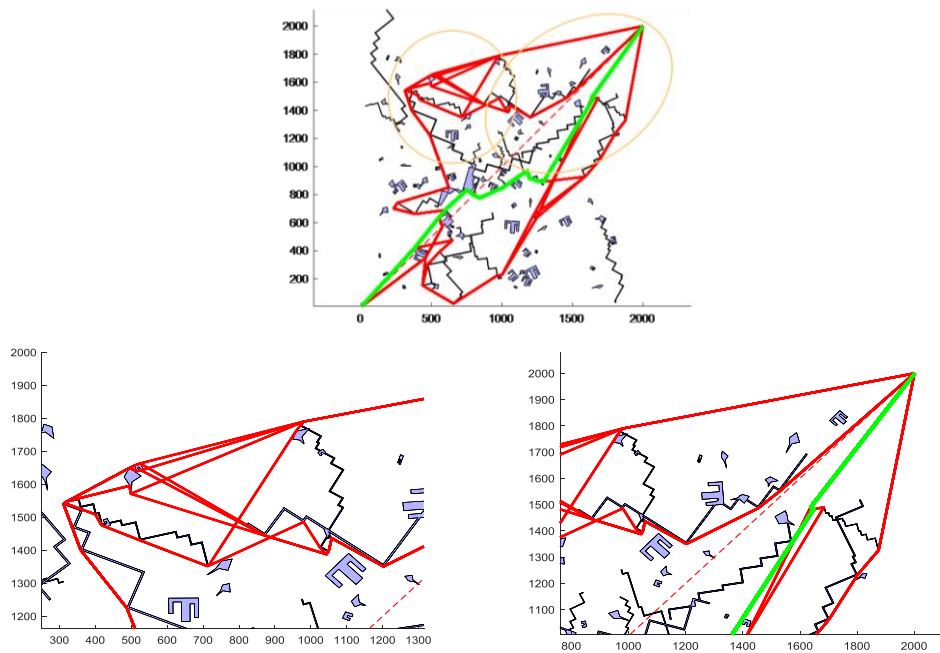


Рис. 2. Пример построения пути с помощью МХГВ

Гибридный алгоритм планирования в 2d-средах. В работе [10] показано, что если при сравнении рассматриваемого алгоритма с алгоритмами клеточной декомпозиции выполнено условие:

$$N2^N \ll n \log(n) + m, \quad (1)$$

тогда рассматриваемый алгоритм обладает неоспоримым относительным преимуществом. Здесь n есть число ячеек свободной области движения, построенных по МКД, m – число всех ребер соответствующего графа, N – число препятствий.

Это условие выполнено всегда для достаточно сложных сцен. Например, для сцены, приведенной на рис. 3,а, левая часть в (1) меньше правой более чем на два порядка.

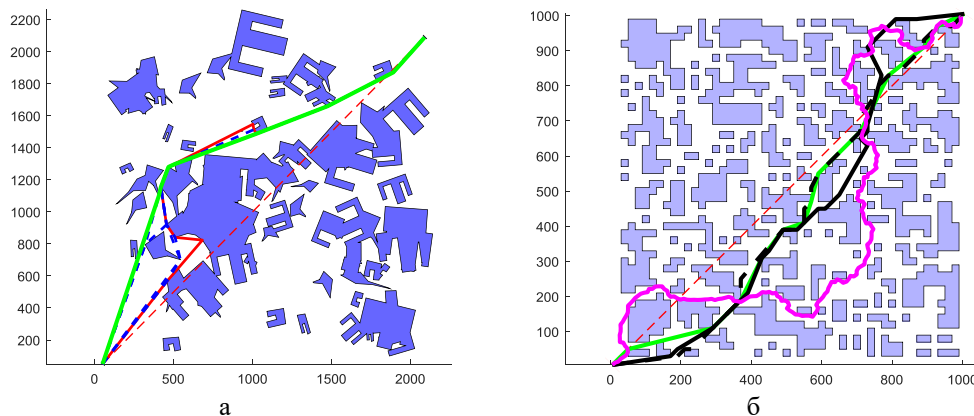


Рис. 3. К пояснению областей применения синтезируемых подходов: а – сложная сцена, требующая для планирования МХГВ; б – сцена с достаточно большим числом гомогенных несложных препятствий, подходящая для МКД

Однако существуют сцены, когда алгоритмы МКД начинают превосходить алгоритм характеристического графа видимости. Для этого сцена должна содержать достаточно большое число относительно простых препятствий. Ярким примером этого являются лабиринты прямоугольного типа, частный случай которых приведен на рис. 2,б. Однако для лабиринта рис. 3,а выполняется приближенное равенство:

$$N2^N \approx n \log(n) + m. \quad (2)$$

По мере масштабирования этого лабиринта при некотором числе препятствий (30-50 шт.), правая часть в (2) начнет значительно превосходить левую.

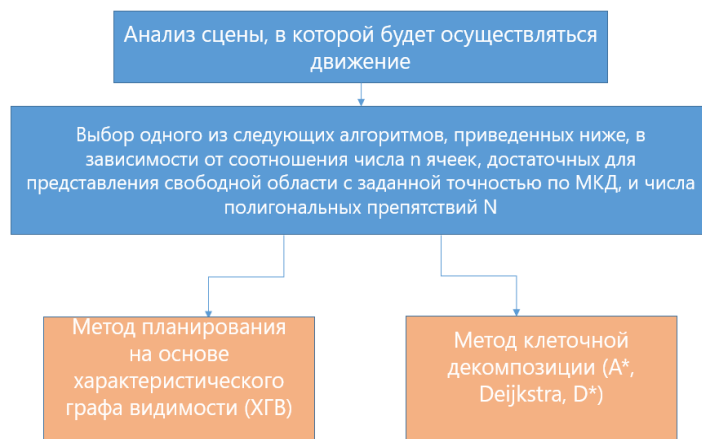


Рис. 4. Общее правило работы гибридного алгоритма планирования в сложных двумерных средах

На основании проведенного анализа разных типов сцен можно сделать вывод: для получения равномерной эффективности планирования в отношении быстродействия алгоритмов для разных типов сцен необходимо переключение между обоими рассмотренными алгоритмами. Таким образом приходим к идее гибридного алгоритма; на первом этапе его работы производится анализ сцены с препятствиями, а далее, путем проверки условий (1), (2) производится выбор одного из алгоритмов – МХГВ или МКД, например, алгоритма Дейкстры, (см. рис. 4) на основании результатов этой проверки.

Необходимо отметить, что такой гибридный алгоритм охватывает практически все встречающиеся на практике типы сцен, которые различаются разными соотношениями между числом препятствий N и необходимым числом ячеек по методу клеточной декомпозиции при условии обеспечения заданной точности представления препятствий.

Метод планирования пути в конфликтных средах. Пусть роботу необходимо двигаться в сложной среде с источниками возмущений. Такими источниками могут быть области радиационного или химического заражения, тепловые поля, источники радиолокационного обнаружения, огневое поражение.

В допустимой/требуемой области движения каким-либо алгоритмом планирования построена предварительная траектория движения робота. Требуется произвести корректировку этой исходной траектории так, чтобы результирующая траектория была безопасна в некотором точном смысле, подлежащем количественной оценке. А именно, поставим в соответствие этой траектории вероятность ее успешного прохождения, когда источники не достигают цели своего воздействия.

На рис. 5 исходная траектория показана пунктиром, а целевая траектория, получаемая после проведения указанной корректировки, есть сплошная зеленая кривая. Для простоты показан один источник с областью действия в виде кругового сектора.

Вначале рассмотрим следующую, вспомогательную, функцию риска:

$$R_{0S}(d, \alpha) = \varepsilon(v) \exp[-(d/d_m)^{2p} - \xi_\alpha |\alpha/\alpha_m|^{2q}], \quad (3)$$

выражающую количественно степень возможных потерь от нахождения объекта в точке M с полярными координатами d, α , где действует по предположению центрально-симметричное поле источника, причем начало системы берется в центре источника; величина $\varepsilon(v)$ есть эффективная частота источника, зависящая от скорости движения v аппарата. В частности, $\varepsilon(v)$ соответствует учету фактора влияния v на вероятность обнаружения подвижного объекта для источников с доплеровскими измерителями. В работе [17], например, предлагается учитывать этот фактор как целую степень скорости V в интегральной формуле введенного в [17] риска.

Параметры p, q, d_m, α_m описывают характер неравномерности функции риска по расстоянию и азимутальному углу. Параметр ξ_α равен 1 при неравномерном азимутальном распределении в функции риска, иначе равен нулю.

Далее введем характеристическую вероятностную функцию (ХВФ) этого источника как экспоненциальную функцию от риска $R_{0S}(d, \alpha)$ в (3):

$$q_{0S}(d, \tau, \alpha) = \exp[\tau \cdot R_{0S}(d, \alpha)], \quad (4)$$

где τ – время нахождения подвижного аппарата в некоторой в окрестности точки $M(d, \alpha)$, причем τ и эта окрестность должны быть настолько малы, чтобы изменениями функции риска $R_{0S}(d, \alpha)$ на этом интервале времени можно было пренебречь. ХВФ дает вероятность успешного прохождения участка траектории, находящегося в указанной малой окрестности, в течение времени τ .

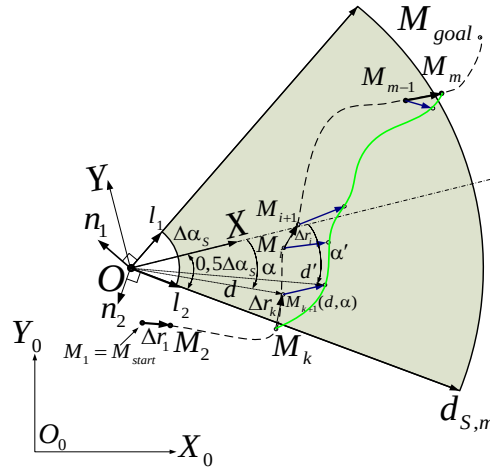


Рис. 5. К постановке задачи об уклонении на примере источника с круговой областью действия

На основании понятия ХВФ можно выразить и вероятность успешного прохождения целиком некоторой траектории Tr в поле действия системы из K источников. В наиболее простом замкнутом виде это делается в классе кусочно-ломаных траекторий [18]:

$$q_S(Tr) = \exp[-\sum_{k=1}^K \varepsilon^{(k)} \cdot I^{(k)}], \quad (5)$$

$$I^{(k)} \cong \frac{\sqrt{\pi} d_m^{(k)}}{2v} \sum_{l=1}^{N-1} \tilde{\eta}_l^{(k)}(A_l, A_{l+1}) \left\{ \exp \left[- \left(\frac{d_l^{(k)} \sin \varphi_l^{(k)}}{d_m^{(k)}} \right)^2 \right] \left[\operatorname{sgn}(\tilde{\rho}_{2,l}^{(k)}) \operatorname{erf}(|\tilde{\rho}_{2,l}^{(k)}|) - \operatorname{sgn}(\tilde{\rho}_{1,l}^{(k)}) \operatorname{erf}(|\tilde{\rho}_{1,l}^{(k)}|) \right] \right\}, \quad (6)$$

$$\tilde{\rho}_{1,l}^{(k)} = \frac{d_l^{(k)} \cos \varphi_l^{(k)}}{d_m^{(k)}}, \tilde{\rho}_{2,l}^{(k)} = \tilde{\rho}_{1,l}^{(k)} + \frac{|A_l A_{l+1}|}{d_m^{(k)}}. \quad (7)$$

Здесь траектория Tr задана совокупностью прямолинейных отрезков $A_l A_{l+1}$, $l=1,2,\dots,N-1$; параметры $\varepsilon^{(k)}$ и $d_m^{(k)}$ – характерные частота и расстояние k -го источника; $d_l^{(k)}(\rho)$ – расстояние от центра k -го источника до точки интегрирования на линейном отрезке A_l, A_{l+1} . Движение аппарата вдоль Tr предполагается с постоянной скоростью V . Функция $\tilde{\eta}_l^{(k)}(A_l, A_{l+1})$ равна единице только в тех случаях, когда одна из точек A_l, A_{l+1} принадлежит области действия k -го источника, в противном случае – равна нулю.

Основным ограничением задачи оптимизации функционала (5) является, как правило, требование нахождения целевой траектории в заданном коридоре движения.

Заметим, что функционал (5) в силу наличия выражений вида $\tilde{\eta}_l^{(k)}$, зависящих от функций принадлежности областей источников, является, вообще говоря, разрывным на границах этих областей. Это обстоятельство усложняет применение эффективных методов численной оптимизации, типа наискорейшего спуска, к решению задачи уклонения.

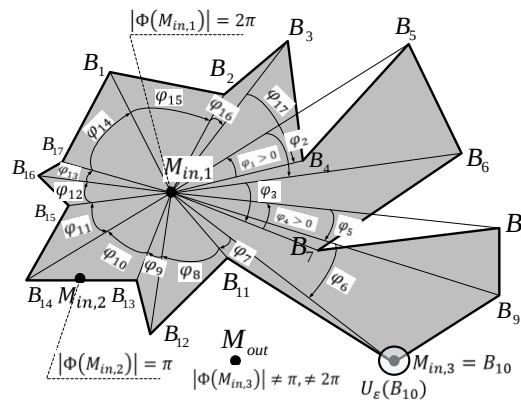


Рис. 6. К нахождению функции принадлежности полигональной области действия источника

С использованием известного метода R-функций Рвачева В.Л. [19], развит обобщенный подход построения аппроксимирующих R-функций для многопозиционных конъюнкции и дизъюнкции как сопровождающих функций, с точностью до так называемого интервала неопределенности [20]:

$$F_{K,n,a}(z) \stackrel{\text{def}}{=} (\bigwedge_{i=1}^n z_i)_R \cong \chi_a \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \chi_a(z_i) - 1 + \varepsilon_K(a, n, 0_\varepsilon, 1_\varepsilon) \right), \quad (8)$$

$$F_{D,n,a}(z) \stackrel{\text{def}}{=} (\bigvee_{i=1}^n z_i)_R \cong \chi_a \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \chi_a(z_i) - \varepsilon_D(a, n, 0_\varepsilon, 1_\varepsilon) \right), \quad (9)$$

где использовано обозначение $(\circ)_R$ для взятия одной из возможных R-функций, относящихся к ветви, индуцируемой данной сопровождающей логической функцией, а функция χ_a есть гладкая аппроксимация функции Хевисайда:

$$\chi_a(t) = \frac{1}{1 + \exp(-2at)}. \quad (10)$$

Величины ε_K и ε_D являются положительными параметрами, удовлетворяющими ограничениям:

$$\begin{aligned} \frac{\ln\left(\frac{1_\varepsilon}{1-1_\varepsilon}\right)}{2a} + 1 - 1_\varepsilon &\leq \varepsilon_K \leq \frac{\ln\left(\frac{0_\varepsilon}{1-0_\varepsilon}\right)}{2a} + \frac{1-0_\varepsilon}{n}, \\ 0_\varepsilon - \frac{\ln\left(\frac{0_\varepsilon}{1-0_\varepsilon}\right)}{2a} &\leq \varepsilon_D \leq \frac{1_\varepsilon}{n} - \frac{\ln\left(\frac{1_\varepsilon}{1-1_\varepsilon}\right)}{2a}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $0_\varepsilon > 0$ – достаточно малое значение функции χ_a , которое можно считать нулем; $1_\varepsilon < 1$ – значение функции χ_a , которое можно считать единицей.

Принадлежность некоторой точки $M(x, y)$ полигональной области действия источника возмущений, рассматриваемого как виртуальный источник, определяется по значению взвешенной суммы углов (см. рис. 6), образованных точкой M и каждой парой соседних вершин границы полигона ($B_{N+1} \equiv B_1$):

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \varphi_i = \sum_{i=1}^N \left\{ \operatorname{sgn}[(x_i - x)(y_{i+1} - y) - (x_{i+1} - x)(y_i - y)] \arccos \left[\frac{(MB_i, MB_{i+1})}{|B_i M| |B_{i+1} M|} \right] \right\}. \quad (12)$$

Если M принадлежит внутренности многоугольника, то $|\Phi| = 2\pi$; если M лежит на одном из ребер, но не принадлежит ни одной из вершин, тогда $|\Phi| = \pi$; случай же совпадения M с одной из вершин требуется проверять отдельно.

Функция принадлежности $\eta_{U_{ohs}}(X)$, фигурирующая в функционале вероятности (5), с точностью до соответствующих ε – окрестностей всех граничных точек полигона может быть представлена с помощью аппроксимирующих сопровождающих функций (8), (9) и определения Φ в (12) в следующем виде:

$$\eta_{poly, 2d}(X) \cong \chi_a \left\{ \frac{1}{3} \left\{ \chi_a \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \chi_a \left(1 - \frac{|MB_i|}{\varepsilon} \right) - \varepsilon_{D1} \right] + \chi_a \left[1 - \left(\frac{\Phi^2 - 4\pi^2}{\varepsilon^2} \right)^2 \right] + \chi_a \left[1 - \left(\frac{\Phi^2 - \pi^2}{\varepsilon^2} \right)^2 \right] \right\} - \varepsilon_{D2} \right\}. \quad (13)$$

В работе [20] введено понятие виртуального источника возмущений, которое прежде всего означает возможность представления самих препятствий в виде некоторой системы источников, каждый из которых описывается некоторой эффективной ХВФ, определяющейся по формуле (4). Такое нововведение можно назвать *униформизацией* понятия источника возмущений.

С использованием предложенного подхода для построения характеристических функций областей действия источников и препятствий и указанной униформизации, в [20] развит дифференциальный метод оптимизации соответствующего вероятностного функционала (18) на множестве траекторий, находящихся в некотором допустимом коридоре относительно исходной кривой:

$$q_s(Tr) \rightarrow \max, \quad (14)$$

при условиях не пересечения препятствий и $\operatorname{dist}(Tr, Tr_0) \leq R_{\max}$, где $\operatorname{dist}(Tr, Tr_0)$ есть расстояние между целевой траекторией Tr и начальной траекторией Tr_0 в некоторой метрике; $R_{\max}$ – заданное положительное число.

Заметим, что при решении целого ряда практических задач уклонения достаточно достигнуть заданного порогового значения $q_s = q_{pr}$.

Получено выражение для нормированного градиента функционала (5) при оценке величин типа $\tilde{\eta}_l^{(k)}$ с помощью (13):

$$\begin{aligned} gr^{(u)} &\equiv \operatorname{grad}_n[q(Tr^{(u)})] = \tilde{gr}^{(u)} / |\tilde{gr}^{(u)}|, \\ \tilde{gr}^{(u)} &= \operatorname{grad}[q(Tr^{(u)})] = -q(Tr^{(u)}) \sum_{k=1}^K [\varepsilon^{(k)} gr I_u^{(k)}], \end{aligned}$$

где компоненты $gr I_u^{(k)} \equiv \operatorname{grad}(I_u^{(k)})$ есть производные $I^{(k)}$ в (6) по переменным типа $\xi_q \in \{x_q, y_q\}$, $1 < q < N$, т.е. по координатам узлов кусочно-ломаной траектории.

Предложен итерационный метод оптимизации, сходный с методом Ньютона-Рафсона и максимизирующий вероятность q в (5) на каждом шаге процедуры градиентного спуска:

$$\lambda_{opt}^{(u)} = \operatorname{argmax}_{\lambda \in [0,1]} \left\{ q \left[Tr^{(u)} + \left(\Delta d_{gr, \min} + \lambda (\Delta d_{gr, \max}^{(u)} - \Delta d_{gr, \min}) \right) gr^{(u)} \right] \right\},$$

где $d_{gr, \min}$ – минимально допустимая длина вектора смещения вдоль градиента в пространстве $\mathbb{R}^{2(N-2)}$ координат всех подвижных узлов. Величина $\Delta d_{gr, \max}^{(u)}$ ограничивается сверху величиной $1/L$, где L – коэффициент Липшица: $\| \operatorname{grad} f(y) - \operatorname{grad} f(x) \|_2 \leq L \|y - x\|_2$.

Итерация в предложенном методе описывается выражением:

$$Tr^{(u+1)} = Tr^{(u)} + \left(\Delta d_{gr,min} + \lambda_{opt}^{(u)} \left(d \Delta_{gr,max}^{(u)} - \Delta d_{gr,min} \right) \right) gr^{(u)}. \quad (15)$$

Показано, что при определенных ограничениях сверху на расстояние между соседними узлами и достаточно малом значении параметра d в аппроксимации функции Хевисайда (10) удастся достигнуть приемлемой скорости сходимости метода градиентного спуска при решении рассматриваемой задачи уклонения (14).

Интерпретация исходного функционала q в качестве индикатора безопасного движения для источников, описываемых накапливающейся во времени физической величиной. Покажем, каким образом можно использовать развитый выше подход на базе характеристических вероятностных функций для решения важной практической задачи – оптимальной, безопасной эвакуации из мест опасных техногенных факторов, в частности, мест с очагами возгорания. Подобная задача рассмотрена в работе [21], где путь оптимальной эвакуации был найден с использованием МКД и сторонней программы анализа тепловых процессов.

Известно, что для оценки степени поражения человека от теплового воздействия очага возгорания используется величина индекса дозы излучения [21]:

$$I = q^{4/3} \Delta t, \quad (16)$$

где q (кВт/м²) – величина теплового потока; Δt (с) – время нахождения в тепловом поле заданной интенсивности. Также известно [22], что предельная пороговая доза теплового облучения, после которой резко увеличивается вероятность летального исхода, определя-

ется величиной $I_{lim} = 450 \text{ с} \cdot \left(\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \right)^{4/3}$. Поэтому для возможности использования развитого в настоящей статье метода источников при решении задачи эвакуации из зоны с возгораниями указанного вида зададим нормировочные предельные удаление от источника d_n и интервал времени T_n нахождения в поле этого источника на расстоянии d_n , когда человек получает предельную дозу I_{lim} . Пусть источник возгорания S_F имеет интенсивность, соответствующую $\hat{T} = 1\text{с}$, $\hat{d} = 100\text{м}$. Это соответствует случаю, когда человек покоится на расстоянии $\hat{d}$ от центра возгорания в течении времени $\hat{T}$, или движется по дуге окружности на удалении $\hat{d}$ от этого центра в течение того же времени.

Пусть дана область возгорания U_{S_F} со сложным полигональным периметром, и примем, что поле теплового излучения в пределах этой области с достаточной степенью точности аппроксимируется некоторой центрально-симметричной функцией расстояния от центра эквивалентного точечного источника.

Рассмотрим величину $q(d, T; \varepsilon, d_m)$, аналогичную по форме характеристической вероятностной функции источника (4) с центрально-симметричным полем в приближении $\xi_a = 0$, зависящую от текущего положения человека относительно области U_{S_F} действия источника и времени T нахождения его в этом положении или в малой его окрестности (малой, в сравнении с расстоянием до источника):

$$q(d, \varphi, T; \varepsilon, d_m) = \eta_{U_{S_F}}(d, \varphi) \exp\{-\varepsilon T \exp[-(d/d_m)^2]\}. \quad (17)$$

Эта функция имеет в качестве параметров: ε – характерную частоту воздействия и d_m – характерный радиус воздействия (который тем больше, чем больше интенсивность источника на данном фиксированном удалении от центра). Величину $q(d, T; \varepsilon, d_m)$ будем называть *нормированной функцией безопасного движения* для одиночного источника возгорания. В формуле (17) $\eta_{U_{S_F}}(d, \varphi)$ есть характеристическая функция области U_{S_F} , зависящая от радиуса-вектора длины d , проведенного из центра источника в некоторой полярной системе координат до точки, где находится человек, под некоторым азимутальным углом φ ; эта функция определяется формой границы указанной области и находится по формуле (13). Вводя предельно допустимую величину

$$q_{lim} = \exp\{-\varepsilon \hat{T} \exp[-(\hat{d}/d_m)^2]\}, \quad (18)$$

видим следующее. Если выполнено условие а) $d \leq \hat{d}$ и $T \geq \hat{T}$, тогда будет выполнено $q \leq q_{lim}$, и, наоборот, если выполнено противоположное условие, то имеет место неравенство $q > q_{lim}$, означающее, что соответствующее нахождение в течении времени T в состоянии покоя или движения на расстоянии d от источника возгорания относительно безопасно в указанном смысле. Если бы были возможны только эти два варианта, то величина q_{lim} была бы идеальным индикатором получения/неполучения предельной дозы I_{lim} теплового излучения. Однако также возможны случаи промежуточные: ($d \leq \hat{d}$ и $T < \hat{T}$) и ($d > \hat{d}$ и $T \geq \hat{T}$) при которых имеется более сложное взаимодействие факторов удаленности от центра и времени нахождения в поле источника. Поэтому в общем случае только корректная идентификация параметров ε , d_m и a в соответствующем приближении центрально-симметричного источника S_F с заданной областью действия U_{S_F} позволит определить адекватную модель данного возгорания и, прежде всего, корректный учет накопления дозы излучения с учетом предельного порога I_{lim} .

Заметим, что чем больше параметр a в (10), тем более точно χ_a аппроксимирует функцию χ единичного скачка, но, одновременно, тем большие ограничения накладываются на возможность применения дифференциальных методов оптимизации функционала (5), рассмотренных в предыдущем разделе.

Каким образом можно распространить случай одного источника возгорания на случай нескольких? Для этого необходимо потребовать, чтобы все эти K источников давали одно и то же значение q_{lim} :

$$q_{lim} = \exp \left\{ -\varepsilon^{(k)} \hat{T}^{(k)} \exp \left[-(\hat{d}^{(k)} / d_m^{(k)})^2 \right] \right\} = const, \quad \text{для } k = 1, 2, \dots, K. \quad (19)$$

Действительно, параметрам $\hat{d}^{(k)}$ и $\hat{T}^{(k)}$ для каждого k -го источника соответствует, согласно предыдущему, одна и та же предельная доза излучения I_{lim} , а она, в свою очередь, должна однозначно порождать соответствующую нормированную функцию безопасного движения.

Таким образом, в рамках рассматриваемой упрощенной модели источников возгорания, количественные свойства каждого из них определяются функцией типа (17) и величинами $\hat{d}^{(k)}$ и $\hat{T}^{(k)}$, а корректная идентификация полного набора параметров $\varepsilon^{(k)}$, $d_m^{(k)}$, $a^{(k)}$, $k = 1, 2, \dots, K$ для системы из K источников производится с учетом условия (19). После этого становится возможным – с точностью до рассматриваемой упрощенной модели центрально-симметричного источника возгорания и произвольной полигональной областью действия решать задачу оптимизации типа (14). Получившийся указанным образом функционал этой задачи будет рассчитываться по формуле, аналогичной (5), его назовем *целевой функцией безопасного движения*.

Однако для практики часто необходимо рассматривать более общую задачу оптимизации, сводящуюся к решению совокупности задач типа (14) для целого ряда начальных кривых. Действительно, при решении, например, задачи эвакуации, целесообразно спланировать предварительно некоторое множество потенциально допустимых траекторий, которые могли бы быть реализованы без учета возгораний. Ограничением на отбор таких траекторий может выступать критерий длины, коррелирующей с максимальной возможным допустимым временем безопасной эвакуации с учетом вероятного разрастания зоны возгорания и возможностями взрывов горючих веществ. После этого надо произвести локальные оптимизации всех таких кривых по критерию максимума вероятности с учетом действия всех источников возгорания, каждый из которых описывается своей нормированной функцией безопасного движения типа (17).

Численный расчет. Рассмотрим пример моделирования уклонения от центрально-симметричных источников возмущений с областями действия в виде круговых секторов. На рис. 7 представлены четыре сцены с такого типа источниками, исходная, предварительно спланированная кривая показана синим пунктиром, а траектория, полученная после процедуры уклонения – сплошной линией зеленого цвета. Для каждой сцены указаны начальная q_0 и конечная q_{fin} вероятности успешного прохождения, а также число итераций численной процедуры градиентного спуска.

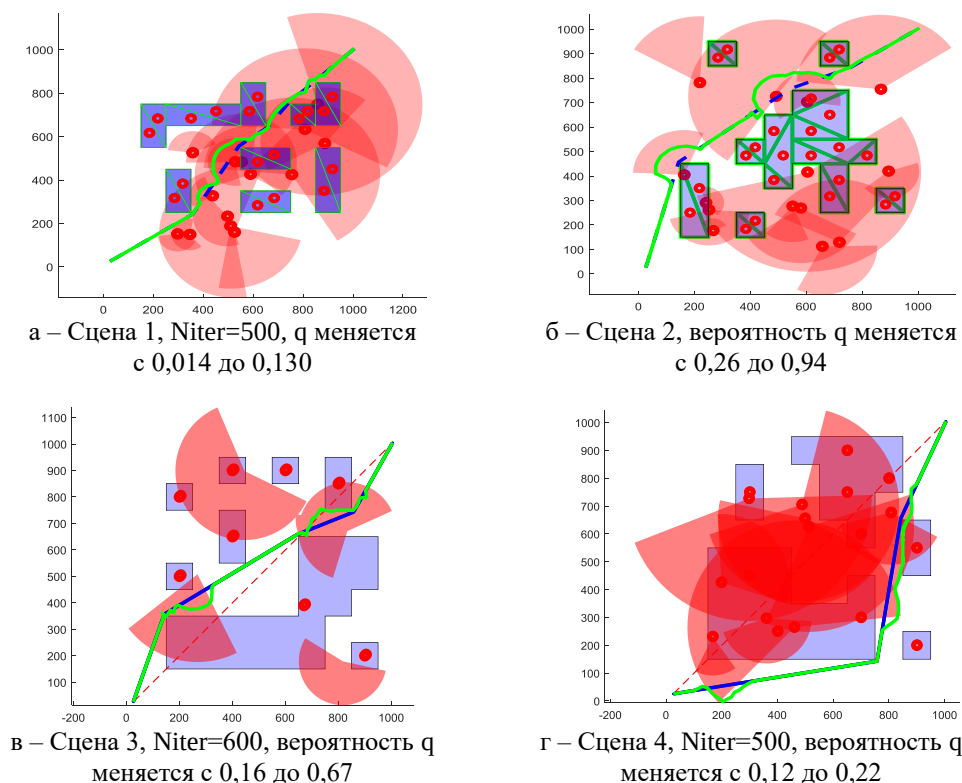


Рис. 7. Результаты моделирования уклонения от системы центрально-симметричных источников с круговыми областями действия

Значение начальной вероятности q_0 определяется параметрами ХВФ источников, их областями действия, а также исходной траекторией. Значение конечной вероятности q_{fin} дополнительно зависит от числа итераций и системы препятствий. Последнее объясняется тем, что в рассматриваемом методе препятствия представляются как виртуальные источники возмущений, поэтому процесс уклонения в окрестностях препятствий существенно зависит от их границ. Для демонстрации идеи униформизации источников для первых двух сцен показано разбиение полигонов препятствий с помощью триангуляции Делоне, при этом каждому полученному треугольнику ставится в соответствие виртуальный источник [20].

На рис. 8 показан пример моделирования поиска безопасного пути эвакуации из зон возгорания.

Рассмотрена среда, включающая несколько стационарных препятствий и источников возгорания. Также присутствует источник химического заражения с областью распространения, которая описывается круговым сектором. Интенсивность этого источника априори неизвестна и при начальной стадии пожара необходимо осуществлять эвакуацию вне детектированной области химического заражения.

Необходимо найти путь эвакуации из указанной зоны в одно из безопасных мест – аварийных выходных коридоров. Ограничением является не превышение временем эвакуации значения, при котором пожар полностью перекрывает пути эвакуации. Задача сводится к нахождению кривой, оптимальной в смысле максимума функции (5), на множестве всех локально оптимизированных кусочно-ломаных. При этом каждая из таких кривых получена на основе одной из исходно заданных траекторий в результате применения оптимизации по (14) с учетом интерпретации функционала q согласно предыдущему разделу. Таким образом, в этом примере для возможности применения разработанного метода оптимизации характеристические вероятностные функции источников (4)

заменяются на нормированные функции безопасного движения согласно (17). Используемый в этом расчете планировщик базируется на методе характеристического графа видимости, рассмотренном в первом разделе выше.

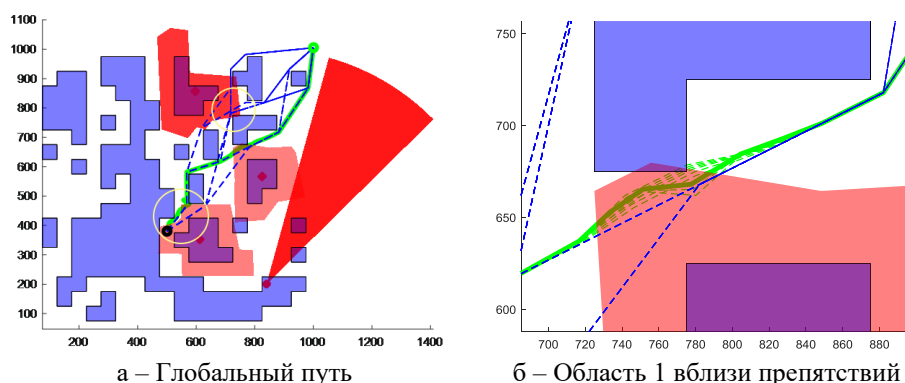


Рис. 8. Нахождение оптимального пути эвакуации из зоны возгорания для первой системы источников

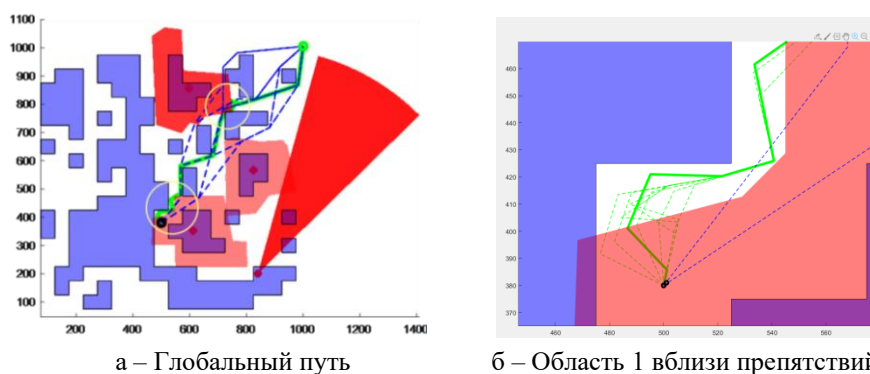


Рис. 9. Нахождение оптимального пути эвакуации из зоны возгорания для второй системы источников

На рис. 8 показан случай, когда имеются три источника возгорания с параметрами: $\varepsilon^{(1)} = 7,5\text{с}^{-1}$, $d_m^{(1)} = 80\text{ м}$, $\varepsilon^{(2)} = 1,825\text{с}^{-1}$, $d_m^{(2)} = 70\text{ м}$, $\varepsilon^{(3)} = 1,01\text{с}^{-1}$, $d_m^{(3)} = 70\text{ м}$. При этом предельная доза теплового излучения I_{lim} достигается в поле действия каждого из источников по отдельности для следующих величин $\hat{T}$ и $\hat{d}$: $\hat{T}^{(1)} = 3\text{ с}$ и $\hat{d}^{(1)} = 120\text{ м}$, $\hat{T}^{(2)} = 10\text{ с}$ и $\hat{d}^{(2)} = 100\text{ м}$, $\hat{T}^{(3)} = 10\text{ с}$ и $\hat{d}^{(3)} = 84\text{ м}$, что соответствует $q_{lim} = 0,0933$. Каждый из источников и препятствий разбивается на систему соответствующих виртуальных источников, с использованием декомпозиции невыпуклых полигонов на выпуклые и триангуляции Делоне. На рис. 8 синим цветом выделены статические препятствия. Красным и розовым цветами выделены области возгорания. Красным конусом обозначена область химического заражения.

Для обеспечения наиболее безопасной эвакуации проложен маршрут, проходящий вблизи второго и третьего источников возгорания и характеризующийся нормированной функцией риска, рассчитываемой по (17) и равной 0,0305. При этом, выполнено неравенство $q \leq q_{lim}$, т.е. оптимальная траектория для системы источников-возгораний, соответствующих случаю рис. 8, не обеспечивает безопасной эвакуации.

На рис. 9 рассмотрен случай, когда интенсивность первого источника уменьшена, $\hat{T}^{(1)} = 8\text{ с}$ и $\hat{d}^{(1)} = 70\text{ м}$. Интервалы времени допустимого нахождения второго и третьего источников снижены до $\hat{T}^{(2)} = \hat{T}^{(3)} = 5\text{ с}$. Параметры источников равны $\varepsilon^{(1)} = 0,6376\text{с}^{-1}$, $\varepsilon^{(2)} = 3,65\text{с}^{-1}$, $\varepsilon^{(3)} = 2,02\text{с}^{-1}$. В этом случае значение $q_{lim} = 0,0933$,

как и в предыдущем случае. При указанных параметрах безопасная траектория существует и проходит в окрестности первого источника, так как теперь выполнено $q = 0,273 > q_{lim} = 0,0933$.

Полученные результаты моделирования позволяют заключить о высокой эффективности разработанного метода решения задач уклонения и построения безопасных траекторий в поле действия источников возмущения.

Преимущества предложенного метода обусловлены, во-первых, учетом накопления соответствующих величин, описывающих воздействие источников разной природы с течением времени на движущийся в их окрестности объект, и, во-вторых, возможностью останова процесса моделирования, как только нужный порог безопасного функционирования q_{pr} будет достигнут. В-третьих, данный метод позволяет работать с источниками и препятствиями, у которых области действия могут иметь достаточно сложные формы.

Заключение. В настоящей статье рассмотрена важная задача планирования движения группы роботов в условиях препятствий и источников возмущений разной природы.

Обоснован новый гибридный алгоритм планирования в сложных средах, базирующийся на сочетании алгоритма клеточной декомпозиции и ранее предложенного алгоритма характеристического графа видимости. Этот алгоритм подразумевает предварительный анализ степени сложности сцены с препятствиями, по результатам которого выбирается один из двух указанных частных алгоритмов, обеспечивающий для данной сцены наибольшую вычислительную эффективность.

Для решения задач локального/глобального планирования перемещений роботов в сложной конфликтной среде на первом этапе может быть использован гибридный алгоритм, рассмотренный в первом разделе, - для построения семейства начальных кривых в соответствующих допустимых коридорах движения в указанной среде *без учета источников*. Далее, на втором этапе, решается семейство задач локальной оптимизации в пределах соответствующих допустимых коридоров движения *с учетом источников*. После чего выбирается траектория с максимальным значением вероятности успешного прохождения либо нормированной функции безопасного движения. В другом случае достаточно выбрать одну из траекторий, на которой уже достигнут заданный порог безопасного функционирования q_{pr} .

Проведено компактное изложение известных результатов по методу ХВФ и соответствующей оптимизации, однако понятие характеристической вероятностной функции здесь введено на основе соответствующей функции риска и показана недостаточность этой последней для введения количественной меры безопасности движения по заданной траектории.

Эффективность развитого подхода подтверждается соответствующими численными расчетами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-61-00017, <https://rscf.ru/project/25-61-00017/>.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sleumer N.H., Tschichold-Gurman N. Exact cell decomposition of arrangements used for path planning in robotics // Zurich: Inst. of Theoretical Computer Science. – 1999. – DOI: 10.3929/ethz-a-006653440.
2. Koenig S., Likhachev M., Furcy D. Lifelong planning A* // Artificial Intelligence. – 2004. – Vol. 155, No. 1-2. – P. 93-146. – DOI: 10.1016/j.artint.2003.12.001.
3. Ferguson D., Stentz A. Using interpolation to improve path planning: The field D* algorithm // J. of Field Robotics. – 2006. – Vol. 23, No. 2. – P. 79-101. – DOI: 10.1002/rob.20109.
4. Mohamed S. Marzouqi and Ray A. Jarvis. New visibility-based path-planning approach for covert robotic navigation // Robotica. – 2006. – Vol. 24, No. 6. – P. 759-773. – doi: 10.1017/S0263574706002931.
5. Petereit J., Emter T. and Frey C. W. Safe mobile robot motion planning for waypoint sequences in a dynamic environment // Proc. 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Cape Town, South Africa, 2013. –P. 181-186. – doi: 10.1109/ICIT.2013.6505669.

6. Wang S., Li Z., Wang B. and Li M. Collision Avoidance Motion Planning for Connected and Automated Vehicle Platoon Merging and Splitting With a Hybrid Automaton Architecture // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – Feb. 2024. – Vol. 25, No. 2. – P. 1445-1464. – doi: 10.1109/TITS.2023.3315063.
7. Guangliang Liao, Chunyun Fu, Yinghong Yu, Kexue Lai, Beihao Xia, and Jingkan Xia. Decoupling Objectives for Segmented Path Planning: A Subtask-Oriented Trajectory Planning Approach // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2025. – Vol. 26, No. 3. – P. 3960-3975.
8. Zhong W., Zheng S., Huang J., Zhou Z., Wu M. and Yu R. Integrating Global Path Information With Advanced Risk Assessment: An Enhanced Potential Field Method for Intelligent Connected Vehicles Local Path Planning // IEEE Sensors Journal. – June, 2025. – Vol. 25, No. 11. – P. 20309-20322. – doi: 10.1109/JSEN.2025.3553534.
9. Костюков В.А., Медведев М.Ю., Пишихонов В.Х. Алгоритм планирования траекторий в двумерной среде с препятствиями на классе кусочно-ломанных траекторий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 5 (235). – С. 34-48.
10. Kostyukov Vladimir, Medvedev Mikhail, Pshikhov Viacheslav. Global Path Planning Algorithm in a Two-Dimensional Environment with Polygonal Obstacles on the Class of Piecewise Polygonal Trajectories // Unmanned Systems. – 2025. – DOI: 10.1142/S2301385025500438.
11. Han-Pang Huang, Shu-Yun Chung. Dynamic visibility graph for path planning // IEEE-RSJ intern. conf. on intelligent robots and systems: IROS 2004 (Sendai, Japan, Sept. 28 - Oct. 2, 2004): Proc. – N.Y.: IEEE, 2004. – Vol. 3. – P. 2813-2818. – DOI: 10.1109/IROS.2004.1389835.
12. Janet J.A., Luo R.C., Kay M.G. The essential visibility graph: An approach to global motion planning for autonomous mobile robots // IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nagoya, Japan, 1995. – 2. – P. 1958-1963.
13. Zhaoying Li, Zhao Zhang, Hao Liu, Liang Yang. A new path planning method based on concave polygon convex decomposition and artificial bee colony algorithm // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2020. – P. 1-15.
14. Habib M.K., Asama H. Efficient method to generate collision free paths for an autonomous mobile robot based on new free space structuring approach // IEEE/R SJ intern. workshop on intelligent robots and systems: IROS'91 (Osaka, Japan, November 3-5, 1991): Proc. Vol. 2. – N.Y.: IEEE, 1991. – P. 563-567. – DOI: 10.1109/IROS.1991.174534.
15. Yufka A., Parlaktuna O. Performance comparison of the BUG's algorithms for mobile robots // Proc. of International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications, Trabzon, Turkey, 2009. – P. 416-421.
16. Ng J., Braunl T. Performance comparison of bug navigation algorithms // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2007. – 50 (1). – P. 73-84.
17. Корепанов В.О., Новиков Д.А. Задача о диффузной бомбе // Проблемы управления. – 2011. – Т. 5. – С. 66-73.
18. Костюков В.А., Медведев М.Ю., Пишихонов В.Х. Процедура оптимизации траектории мобильного робота в поле источников-репеллеров // Тр. СПИИРАН. – 2021. – Т. 20 (3). – С. 690-726 (Scopus, Web of Science Core Collection).
19. Рвачёв В.Л. Теория R-функций и её приложения. – Киев: Наукова Думка, 1982. – 552 с.
20. Kostyukov V., Medvedev M., Pshikhov V. A Probabilistic Functional-Based Trajectory Planning Method in an Environment with Obstacles and Hazardous Areas // Unmanned Systems. – 2025. – Vol. 12(3). – P. 1-22. – DOI: <https://doi.org/10.1142/S230138502750049X> (Scopus, WoS, Q1).
21. Chou G. et al. Emergency evacuation paths for tank farm fires based on bi-objective dynamic planning // Rep. – 2025. – 15 8887. – <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93567-4>.
22. Fire Protection Association. Fire Safety and Risk Management: for the NEBOSH National Certificate in Fire Safety and Risk Management. – 1st ed. – Routledge, 2014. – <https://doi.org/10.4324/9781315858715>.

REFERENCES

1. Sleumer N.H., Tschichold-Gurman N. Exact cell decomposition of arrangements used for path planning in robotics, Zurich: Inst. of Theoretical Computer Science, 1999. DOI: 10.3929/ethz-a-006653440.
2. Koenig S., Likhachev M., Furcy D. Lifelong planning A*, Artificial Intelligence, 2004, Vol. 155, No. 1-2, pp. 93-146. DOI: 10.1016/j.artint.2003.12.001.
3. Ferguson D., Stentz A. Using interpolation to improve path planning: The field D* algorithm, J. of Field Robotics, 2006, Vol. 23, No. 2, pp. 79-101. DOI: 10.1002/rob.20109.
4. Mohamed S. Marzouqi and Ray A. Jarvis. New visibility-based path-planning approach for covert robotic navigation, Robotica, 2006, Vol. 24, No. 6, pp. 759-773. doi: 10.1017/S0263574706002931.

5. Petereit J., Emter T. and Frey C. W. Safe mobile robot motion planning for waypoint sequences in a dynamic environment, *Proc. 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. Cape Town, South Africa, 2013, pp. 181-186. doi: 10.1109/ICIT.2013.6505669.
6. Wang S., Li Z., Wang B. and Li M. Collision Avoidance Motion Planning for Connected and Automated Vehicle Platoon Merging and Splitting With a Hybrid Automaton Architecture, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Feb. 2024, Vol. 25, No. 2, pp. 1445-1464. doi: 10.1109/TITS.2023.3315063.
7. Guangliang Liao, Chunyun Fu, Yinghong Yu, Kexue Lai, Beihao Xia, and Jingkang Xia. Decoupling Objectives for Segmented Path Planning: A Subtask-Oriented Trajectory Planning Approach, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025, Vol. 26, No. 3, pp. 3960-3975.
8. Zhong W., Zheng S., Huang J., Zhou Z., Wu M. and Yu R. Integrating Global Path Information With Advanced Risk Assessment: An Enhanced Potential Field Method for Intelligent Connected Vehicles Local Path Planning, *IEEE Sensors Journal*, June, 2025, Vol. 25, No. 11, pp. 20309-20322. doi: 10.1109/JSEN.2025.3553534.
9. Kostyukov V.A., Medvedev M.Yu., Pshikhov V.Kh. Algoritmi planirovaniya traektoriy v dvumernoy srede s prepyatstviyami na klasse kusochno-lomanykh traektoriy [Algorithm for planning trajectories in a two-dimensional environment with obstacles on the class of piecewise-broken trajectories], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 5 (235), pp. 34-48.
10. Kostyukov Vladimir, Medvedev Mikhail, Pshikhov Viacheslav. Global Path Planning Algorithm in a Two-Dimensional Environment with Polygonal Obstacles on the Class of Piecewise Polygonal Trajectories, *Unmanned Systems*, 2025. DOI: 10.1142/S2301385025500438.
11. Han-Pang Huang, Shu-Yun Chung. Dynamic visibility graph for path planning, *IEEE-RSJ intern. conf. on intelligent robots and systems: IROS 2004 (Sendai, Japan, Sept. 28 - Oct. 2, 2004): Proc.* N.Y.: IEEE, 2004, Vol. 3, pp. 2813-2818. DOI: 10.1109/IROS.2004.1389835.
12. Janet J.A., Luo R.C., Kay M.G. The essential visibility graph: An approach to global motion planning for autonomous mobile robots, *IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nagoya, Japan, 1995*, 2, pp. 1958-1963.
13. Zhaoying Li, Zhao Zhang, Hao Liu, Liang Yang. A new path planning method based on concave polygon convex decomposition and artificial bee colony algorithm, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2020, pp. 1-15.
14. Habib M.K., Asama H. Efficient method to generate collision free paths for an autonomous mobile robot based on new free space structuring approach, *IEEE/RSJ intern. workshop on intelligent robots and systems: IROS'91 (Osaka, Japan, November 3-5, 1991): Proc.* Vol. 2. N.Y.: IEEE, 1991, pp. 563-567. DOI: 10.1109/IROS.1991.174534.
15. Yufka A., Parlaktuna O. Performance comparison of the BUG's algorithms for mobile robots, *Proc. of International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications, Trabzon, Turkey, 2009*, pp. 416-421.
16. Ng J., Brauml T. Performance comparison of bug navigation algorithms, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2007, 50(1), pp. 73-84.
17. Korepanov V.O., Novikov D.A. Zadacha o diffuznoy bombe [The problem of a diffuse bomb], *Problemy upravleniya* [Problems of Control], 2011, Vol. 5, pp. 66-73.
18. Kostyukov V.A., Medvedev M.Yu., Pshikhov V.Kh. Protsedura optimizatsii traektorii mobil'nogo robota v pole istochnikov-repellerov [Procedure for optimizing the trajectory of a mobile robot in a field of source-repellers], *Tr. SPIIRAN* [Proceedings of SPIIRAS], 2021, Vol. 20(3), pp. 690-726 (Scopus, Web of Science Core Collection).
19. Rvachev V.L. Teoriya R-funktsiy i ee prilozheniya [Theory of R-functions and its applications]. Kiev: Naukova Dumka, 1982, 552 p.
20. Kostyukov V., Medvedev M., Pshikhov V. A Probabilistic Functional-Based Trajectory Planning Method in an Environment with Obstacles and Hazardous Areas, *Unmanned Systems*, 2025, Vol. 12(3), pp. 1-22. DOI: <https://doi.org/10.1142/S230138502550049X> (Scopus, WoS, Q1).
21. Chou G. et al. Emergency evacuation paths for tank farm fires based on bi-objective dynamic planning, *Rep.*, 2025, 15 8887. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93567-4>.
22. Fire Protection Association. Fire Safety and Risk Management: for the NEBOSH National Certificate in Fire Safety and Risk Management. 1st ed. Routledge, 2014. Available at: <https://doi.org/10.4324/9781315858715>.

Костюков Владимир Александрович – НИИ Робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: wkost-einheit@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; к.т.н.; с.н.с.

Kostyukov Vladimir Aleksandrovich – Research and Development Institute of Robotics and Control System of Southern Federal University; e-mail: wkost-einheit@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев**МЕТОДЫ СБОРА ДАННЫХ СРЕДСТВАМИ БПЛА ПРИ МОНИТОРИНГЕ
ТРУДНОДОСТУПНОЙ МЕСТНОСТИ**

Предложены методика и метод построения модели исследуемой территории в виде конечной совокупности покрывающих ее зон (участков), отличающиеся тем, что все участки имеют форму прямоугольников. В работе рассматриваются методы формирования на поле большой площади минимального набора участков, полностью покрывающих доступную территорию, исследуемую датчиками беспилотных летательных аппаратов. Размеры, ориентация и взаимное расположение участков направлены на минимизацию времени их исследования. В общем случае маршрут М представляет последовательную совокупность линейных отрезков. Разбиение маршрута М на отрезки осуществляется с помощью множества опорных точек Р. Разработана методология и алгоритм построения оптимального маршрута беспилотного летательного аппарата, на основе метода муравьиной колонии. Разработаны механизмы управления перемещениями беспилотного летательного аппарата по маршруту. В общем случае маршрут М представляет последовательную совокупность линейных отрезков. Отрезок пути (траектории маршрута) беспилотного летательного аппарата над исследуемым участком территории, подвергаемым сканированию (исследованию), назван рабочим, а отрезок пути (траектории) беспилотного летательного аппарата над территорией, не подвергаемой сканированию, (исследованию) называется холостым. В общем случае маршрут представляет чередующуюся последовательность рабочих и холостых отрезков, поочередно сменяющих друг друга. Разработана методология и алгоритм перемещения беспилотного летательного аппарата между опорными точками отрезка, соответствующими опорным точкам. Процедура поиска решения представляется в виде двух алгоритмов: алгоритм 1 поведения муравьиной колонии; алгоритм 2 поведения агента. Процесс перемещения беспилотного летательного аппарата по маршруту в реальных условиях поддерживается блоком адаптации. Задача блока адаптации обеспечить управление перемещением беспилотного летательного аппарата вдоль опорной линии по маршруту. Способ управления заключается в том, чтобы в процессе движения в каждый момент времени производится перепланирование параметров движения беспилотного летательного аппарата, движущегося параллельно к опорному вектору. Адаптация беспилотного летательного аппарата сводится к адаптации значений параметров управления. Предложена структуры маневров, выполняемых беспилотными летательными аппаратами для коррекции отклонений параметров. Задача адаптации состоит в том, чтобы сформировать в автомате адаптации последовательность адаптирующих воздействий, экстремизирующих показатели качества получаемых решений (критерии адаптации). В качестве объекта адаптации служат набор параметров непрерывного управления полетом: отклонение беспилотного летательного аппарата от опорной линии; угол между вектором перемещения беспилотного летательного аппарата и опорной линией текущего участка; высота полета беспилотного летательного аппарата над текущим участком. Адаптация беспилотного летательного аппарата сводится к адаптации значений параметров управления.

Система управления; беспилотные летательные аппараты; мониторинг территории; маршрут; коллективная альтернативная адаптация; мультиагентная система.

B.K. Lebedev, O.B. Lebedev**METHODS OF DATA COLLECTION BY UAVS WHEN MONITORING
HARD-TO-REACH TERRAIN**

This paper proposes a methodology and method for constructing a model of the study area as a finite set of zones (sections) covering it, characterized by the fact that all sections are rectangular. The paper examines methods for forming a minimal set of sections on a large field that completely cover the accessible territory surveyed by unmanned aerial vehicle (UAV) sensors. The size, orientation, and relative positions of the sections are aimed at minimizing their survey time. In general, a route M is a sequential set of linear segments. Route M is divided into segments using a set of control points P. A methodology and algorithm for constructing an optimal UAV route based on the ant colony method have been developed. Mechanisms for controlling the UAV's movements along the route have been developed. In general, a route M is a sequential set of linear segments. A segment of the UAV's path (trajectory) over a surveyed

area of territory being scanned (explored) is called a working segment, while a segment of the UAV's path (trajectory) over a non-scanned (explored) area is called a dummy segment. Generally, a route is an alternating sequence of working and dummy segments, replacing each other. A methodology and algorithm for moving an UAV between reference points of a segment corresponding to reference points have been developed. Two algorithms represent the solution search procedure: Algorithm 1, which describes the behavior of an ant colony; Algorithm 2, which describes the behavior of an agent. An adaptation unit supports the process of moving an UAV along a route in real-world conditions. The adaptation unit's task is to control the UAV's movement along a reference line along the route. The control method involves replanning the motion parameters of an unmanned aerial vehicle (UAV) moving parallel to a reference vector at each moment during flight. Adaptation of the UAV consists of adapting the control parameter values. A structure of maneuvers performed by UAVs to correct parameter deviations is proposed. The adaptation task consists of generating a sequence of adaptive actions in the adaptation machine that extremize the quality indicators of the resulting solutions (adaptation criteria). The adaptation object is a set of continuous flight control parameters: the UAV's deviation from the reference line; the angle between the UAV's motion vector and the reference line of the current segment; and the UAV's flight altitude above the current segment. Adaptation of the UAV consists of adapting the control parameter values.

Control system; unmanned aerial vehicles; territory monitoring; route; collective alternative adaptation; multi-agent system.

Введение. Одним из активно развивающихся направлений робототехники является синтез алгоритмов управления роботами, которые выполняют общую поставленную задачу. Мобильные автономные системы для решения различного типа задач стали одним из признаков современности. Разработкой данных систем занимаются коллективы различных стран. Использование мобильных роботов является обоснованным в различных ситуациях, связанных с автоматизацией производства.

Мобильные роботы применяются в промышленности, логистике, сельском хозяйстве и при ликвидации последствий ЧС, поскольку они необходимы для выполнения работ в опасных или труднодоступных для человека условиях [1–4]. В этих условиях особенно важно создавать алгоритмы управления поведением роботов, способных адаптироваться к динамике среды и неопределенности исходных данных.

В последнее время для мониторинга состояния труднодоступной местности в качестве мобильных узлов сбора данных для передачи информации используют сети датчиков, расположенных на БПЛА (беспилотных летательных аппаратов) и наземных беспилотных роботов (НБР). БПЛА и НБР используются для обеспечения автоматического высокоточного сбора данных на территории местности.

БПЛА и НБР осуществляет мониторинг на местности: поиск места крушения самолета (объекта на местности), исследование состояния местности после землетрясения, поиск пропавшей группы (человека), поиск очага возгорания, сход геля, наводнения.

Сначала БПЛА определяет вероятностные области катастрофы, потом уточняется результат поиска. Область разбивается на подобласти, а затем выполняется последовательное разбиение области на участки. После информации, полученной от БПЛА наземный НБР отправляется к найденному беспилотным летательным аппаратом вероятному месту поиска из пункта отправления и выполняет доставку груза, оборудования, в условиях бездорожья и отсутствия спроектированных маршрутов и траекторий между пунктами отправления и доставки. После обнаружения БПЛА искомого объекта исследований часто возникает потребность в тщательном исследовании объекта. в этом случае организуется доставка объекта на базу с помощью наземных транспортных средств.

Методология и методы сбора данных сенсорными узлами БПЛА и НБР основана на дистанционном исследовании. Способность БПЛА к полету позволяет им быстро в непосредственной близости от объекта перемещаться, обходя препятствия на местности. Возможны два варианта использования БПЛА для мониторинга: последовательный и параллельно-последовательный. Вся территория разбивается на примерно равные области. Первый вариант предусматривает последовательное исследование областей.

При втором варианте области исследуются параллельно группой БПЛА независимо друг от друга, каждая область исследуется отдельными БПЛА. После завершения исследования областей производится объединение собранной информации.

Сенсорный узел выполняет функции сбора информации, её первичной обработки и передачи по беспроводному каналу [5–7]. Основная особенность сенсорных узлов заключается в совмещении в узле приёмопередатчика и измерительного датчика. Датчики – это «органы чувств» роботов, которые помогают им воспринимать окружающий мир. Они фиксируют изменения среды (свет, звук, давление) и преобразуют их в электрические сигналы для обработки.

Технология работает следующим образом: датчик БПЛА передает высокочастотное излучение, которое отражается от поверхности земли. Отраженные электромагнитные волны имеют различную поляризацию и преломление в зависимости от состояния поверхности. Эти характеристики воздействуют на электропроводность, которая измеряется приемником БПЛА. Полученные данные после обработки позволяют определить параметры поверхности. Система навигации обеспечивает непрерывное планирование траектории полета [8].

БПЛА осуществляет сбор данных, следуя по определенному маршруту, проходя через узлы маршрута. В данной статье рассматриваются структура и методы построения маршрута, обеспечивающей эффективный сбор данных сенсорными датчиками БПЛА, с распределенных участков территории. Маршрут БПЛА должен быть спроектирован так, чтобы БПЛА последовательно «посещал» участки территории, состояние которых фиксируется сенсорами, установленными на БПЛА.

Основные этапы работы:

- ◆ Представление исследуемой территории в виде конечной совокупности покрывающих ее зон (участков). Решается задача формирования минимального количества участков, полностью покрывающих исследуемую территорию.
- ◆ Разработка методологии и метода построения оптимальной траектории БПЛА, проходящей через все участки.
- ◆ Разработка механизмов управления перемещениями БПЛА по траектории.

Формирование множества базовых участков $U=(u_i, i=1,2,...,n)$, $|U|=n$ на поле исследуемой территории датчиками БПЛА зависит от технических возможностей. Чем больше мы увеличиваем радиус r покрытия окрестности сигналом датчика беспилотного летательного аппарата, тем шире становится его зона охвата окрестности. В то же время, суммарная длина маршрута, сформированного для сбора данных в определенной области, уменьшается, то есть маршрут становится короче.

Маршрут и модель движения БПЛА по маршруту разрабатывается с учётом радиуса покрытия поверхности сенсорами.

Цель исследования заключается в разработке эффективных алгоритмов планирования маршрута при минимально возможной длине маршрута и минимальном времени прохождения маршрута, обеспечивающих полное исследование территории сенсорами БПЛА и разработке адаптивных механизмов перемещения БПЛА в реальных условиях по заданному маршруту.

Разбиение исследуемой территории на множество участков. Как правило, основная задача, возлагаемая на комплексы БПЛА – проведение разведки труднодоступных районов, в которых получение информации обычными средствами, включая авиаразведку, затруднено или же подвергает опасности здоровье и даже жизнь людей.

Постановка задачи для БПЛА – это четкое определение целей, условий полета, маршрута и полезной нагрузки (камера, датчики) для выполнения миссии, например мониторинга местности. Она включает выбор типа БПЛА, расчет траектории, времени полета и действий при нештатных ситуациях, обеспечивая автоматический или полуавтоматический режим работы.

Любая из подсистем БПЛА (наблюдение, связь, электропитание, энергообеспечение) является производной, заимствованной из смежной отрасли и в данной работе не рассматриваются. Конечными целями являются разведка и мониторинг (фото/видеосъемка) местности, картография.

В качестве объектов воздействия рассматриваются координаты целей, границы области мониторинга или конкретные объекты для инспекции.

Основные критерии – минимизация времени полета, полнота покрытия территории. Необходимо построить оптимальный маршрут с учетом возможных препятствий.

Для решения поставленных задач в работе используются элементы алгоритмов управления: поиска пути в пространстве, коллективная альтернативная адаптации, навигация и управление при полете по заданной траектории, стабилизацию углов ориентации аппарата в полете.

На начальном этапе мониторинга местности производится первичный обзор местности с помощью БПЛА и формируются границы территории для более тщательных исследований. Выбранная для исследования исходная территория T в пределах заданных границ может быть неоднородной и включать области не доступные для их мониторинга средствами БПЛА в силу их физических свойств (болота, участки, покрытые густой зарослью и т.д. После анализа исходной территории на ее базе формируются контуры территории, доступной для мониторинга. За каждой территорией закрепляются два робота: БПЛА и наземный робот БНР. На основе первичной информации определяется район исследований, который разбивается по карте местности на участки [9, 10].

Задача минимизации общего пути беспилотного летательного аппарата основана на дистанционном измерении характеристик поверхности земли с помощью беспилотных летательных аппаратов.

В работе рассматриваются методы формирования на поле большой площади минимального набора участков, полностью покрывающих доступную территорию, в которых датчики БПЛА снимают информацию. Размеры, ориентация и взаимное расположение участков направлены на минимизацию времени их исследования [9–11].

Рабочее пространство исследуемой территории представляет собой прямоугольную область $\Omega = [0, L_x] \times [0, L_y] \subset R^2$ в двумерной системе координат, где $L_x, L_y > 0$ – размеры области в условных единицах длины (у.е.). Область Ω разбивается вертикальными линиями на полосы (рис. 1) заданной ширины. В зависимости от состояния и свойств рельефа территории в составе каждой полосы определяется зоны недоступные для исследования. Недоступные зоны исключаются из рассмотрения. Таким образом, каждая полоса распадается на множество доступных $U = \{u_i | i=1, \dots, n_u\}$ и недоступных участков. Недоступный участок помечен знаком Θ . Участки нумеруются от 1 до n . Определяются границы k_i^1 и k_i^2 от начала и до конца каждого участка u_i в составе полосы и их координаты. Каждый доступный участок $u_i \in U$ ограничен двумя концами k_i^1 и k_i^2 . Верхний индекс – номер конца участка, нижний индекс – номер участка. Расположение k_i^1 и k_i^2 на участке u_i фиксировано. Поскольку расположение всех участков на территории фиксировано, то и оба конца k_i^1 и k_i^2 каждого участка u_i имеют фиксированные координаты размещения на исследуемой территории. На рис. 1 приведена модель территории.

Формируется исходное множество $K = \{k_i^\alpha | \alpha=1,2; i=1, \dots, n\}$ концов k_i^1 и k_i^2 участков u_i . Обозначим координаты позиций, занимаемыми концами участка u_i : для k_i^1 как (x_{1i}, y_{1i}) ; для k_i^2 , как (x_{2i}, y_{2i}) . У всех u_i : $y_{1i} < y_{2i}$; $x_{1i}^2 = x_{2i}^2$, рис. 2.

По середине каждого участка $u_i \in U$ проводится виртуальная опорная линия l_i , ограниченная двумя концами k_i^1 и k_i^2 . Опорная линия l_i в двумерном пространстве, служит ориентиром для БПЛА, при его перемещении на высоте z вдоль линии в двумерном пространстве от одного конца участка к другому, в целях полного покрытия участка сигналом сенсора БПЛА.

БПЛА движется на постоянной высоте (то есть $z=h$) в двумерной системе координат. В каждый момент времени t его положение определяется координатами $(x(t), y(t))$ и постоянной координатой z .

Исследуемая территории (объект исследования) описывается в двумерной системе координат. Основная задача – построение маршрута в двумерной системе координат.

В работе маршрут M представляет последовательную совокупность линейных отрезков в двумерной системе координат. Разбиение маршрута M на отрезки осуществляется с помощью множества опорных точек $P = \{p_v | v=1, 2, \dots, n_p\}$. Каждый отрезок маршрута связывает опорные точки (p_v, p_{v+1}) . Каждая опорная точка соответствует определенному концу участка.

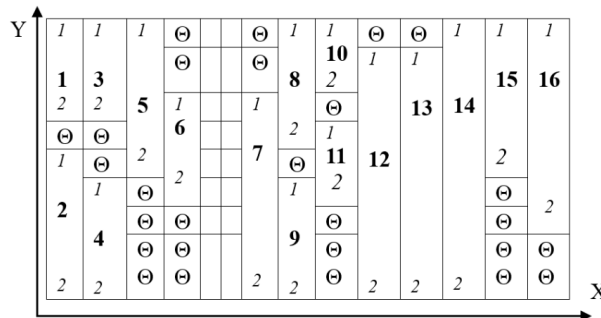


Рис. 1. Рабочее пространство исследуемой территории

i	1				2				3				4				5			
k	k_i^1		k_i^2		k_i^1		k_i^2		k_i^1		k_i^2		k_i^1		k_i^2		k_i^1		k_i^2	
	x_1	y_1	x_1	y_1	x_1	y_1	x_1	y_1	x_1	y_1	x_1	y_1	x_1	y_1	x_1	y_1	x_1	y_1	x_1	y_1
	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i

Рис. 2. Координаты концов k_i^1 и k_i^2 участков u_i

На рис. 1 исследуемой территории 16 участков. Последовательность исследуемых участков определяется в процессе движения БПЛА по маршруту в двумерной системе координат. Каждый из концов k_i^1 и k_i^2 участка могут служить точкой входа или выхода из участка. Возникает проблема выбора конца входа в участок. Второй конец участка служит выходом в последующий участок. Возможны четыре варианта (рис. 3.)

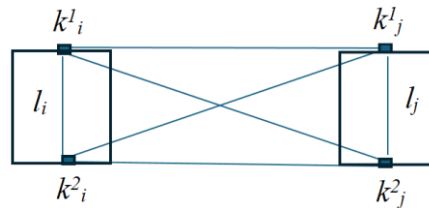


Рис. 3. Варианты перехода БПЛА между соседними участками в маршруте

Между множеством концов K и сформированным множеством опорных точек P построенного маршрута устанавливается взаимно однозначное соответствие $f: K \rightarrow P$. $f(k) = p$. Для всех участков территории каждому концу $k_i \in K$ участка соответствует некоторая опорная точка p_i маршрута с фиксированными координатами концу k_i и наоборот. Третья координата у всех опорных точек равна высоте полета БПЛА. Линейный отрезок маршрута БПЛА над участком территории u_i между концами k_i^1 и k_i^2 одного участка, подвергается сканированию (исследованию), назовем рабочим, а линейный отрезок маршрута БПЛА, над не подвергаемой сканированию (исследованию) территорией, назовем холостым [12].

В общем случае маршрут представляет чередующуюся последовательность n рабочих и $(n-1)$ холостых отрезков, поочередно сменяющих друг друга.

Вариант маршрута, представленной на рис. 1 имеет вид:

$(11, 12) \leftrightarrow (21, 22) \leftrightarrow (42, 41) \leftrightarrow (32, 31) \leftrightarrow (51, 52) \leftrightarrow (62, 61) \leftrightarrow (71, 72) \leftrightarrow (92, 91) \leftrightarrow (112, 111) \leftrightarrow (82, 81) \leftrightarrow (101, 102) \leftrightarrow (121, 122) \leftrightarrow (132, 131) \leftrightarrow (141, 142) \leftrightarrow (152, 151) \leftrightarrow (161, 162)$, где большая цифра обозначает номер участка. Графическое изображение маршрута представлено на рис. 4.

БПЛА перемещаясь от начальной точки по маршруту последовательно и в порядке очереди просматривает участки. В пределах каждого участка u_i робот перемещается над участком от одного конца к другому концу участка.

БПЛА рассматривается как мобильный узел, имеющий динамическую зону покрытия радиусом r и соответственно ширина покрываемой полосы равна $2r$.

Площадь покрытия представляет собой прямоугольник и напрямую зависит от расстояния l перемещения БПЛА вдоль полосы, радиуса сигнала r и определяется как $Q=l \cdot 2r$, где l – это расстояние между двумя концами участка, пройденное БПЛА вдоль участка полосы; ширина $2r$ – удвоенный радиус сигнала.

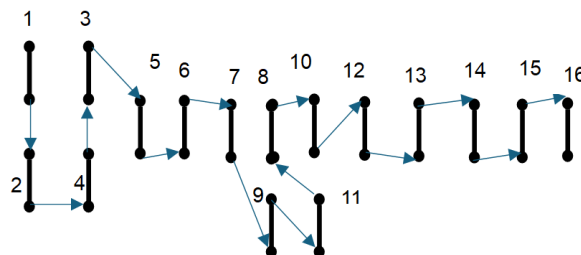


Рис. 4. Графическое представление траектории

Зона покрытия формируется в процессе перемещения БПЛА. При этом границы охвата сигнала расширяются по направлению движения [13, 14].

Робот при перемещении вдоль участка не должен отступать от опорной линии на величину больше δ для исключения недопустимого сдвига зоны покрытия.

Построения оптимальной траектории полёта беспилотного летательного аппарата. Маршрут робота задается упорядоченным списком концов участков, разбивающих маршрут на отрезки. Маршрут БПЛА должен быть спроектирован так, чтобы он последовательно посещал все участки [15].

Предложенные методы направлены на минимизацию длины маршрута, так как реализация любого поворота БПЛА требует замедления перемещения БПЛА по маршруту перед поворотом. БПЛА рассматривается как мобильный узел, имеющий динамическую зону покрытия радиусом r и соответственно ширина покрываемой полосы равна $2r$. Вариант построенной траектории можно увидеть на рис. 2.

В данной статье рассматриваются методы построения оптимальной траектории БПЛА, обеспечивающие эффективный сбор данных датчиками БПЛА с распределенных участков территории. Предложенные методы направлены на минимизацию длины маршрута и полное покрытие участков зонами датчиков за счет учета их радиуса действия.

Для построения оптимальной траектории БПЛА, обеспечивающей эффективный сбор данных датчиками БПЛА с распределенных участков территории, разработан алгоритм на основе модифицированного метода муравьиной колонии. Предложенный метод направлен на минимизацию длины маршрута и полное покрытие участков зонами датчиков за счет учета их радиуса действия и зависимости от их ориентации [16].

Процесс поиска решений итерационный. Каждая итерация l включает три этапа. На первом этапе каждой итерации каждый агент находит решение (строит маршрут на графе $G(X, E)$), определяется оценка решения. На втором этапе каждый агент откладывает феромон в накопительные ячейки, соответствующие ребрам маршрута. Количество феромона, откладываемого агентом на ребрах маршрута, пропорционально оценке маршрута. После построения всеми агентами маршрутов феромон, накопленный в накопительных ячейках добавляется в ячейки основной памяти. На третьем этапе осуществляется испарение феромона в ячейках памяти. Завершается итерация определением лучшего решения, найденного на этой итерации, и лучшего решения среди всех итераций. Формирование k -м муравьем маршрута осуществляется последовательно (пошагово).

Рассмотрим процесс построения агентом маршрута M на множестве участков $U=\{u_i | i=1, 2, \dots, n_u\}$. Формируется исходное множество $K=\{k_i^\alpha | \alpha=1, 2; i=1, \dots, n\}$ всех концов множества участков U .

Построение маршрута по шагам начинается с участка u_i . $t=1$. Определяется координаты начальной p_{1i} и конечной p_{2i} точек рабочего отрезка маршрута, пролегающего над участком u_i , соответствующие его концам. p_{1i} – концу k^1_i . p_{2i} – концу k^2_i , (рис. 5).

После перемещения БПЛА над рабочим участком u_i от точки p_{1i} до точки p_{2i} , точка p_{2i} объявляется аттрактором. Далее среди всех концов (k^1_i и k^2_i), не пройденных роботом рабочих участков, выбирается ближайший к аттрактору p_{2i} свободный конец участка u_j , который помечается как p_{1j} . Холостой отрезок c_{ij} маршрута между точками (p_{2i} , p_{1j}) соответствует пути перелета робота с участка u_i на участок u_j .

Для построенной части маршрута $M = \langle p_{1i}, p_{2i}, p_{1j}, p_{2j}, p_{2k}, p_{1k}, p_{2m}, p_{1m}, \dots \rangle$.

$$MC = \langle u_i, c_{ij}, u_j, c_{jk}, u_k, c_{km}, u_m \dots \rangle.$$

Мониторинг очередного участка u_i выполняется в процессе перемещения БПЛА от одного конца участка к другому. После мониторинга роботом участка u_i осуществляется выбор ближайшего конца (k^1_i или k^2_i) следующего участка u_j , который рассматривается как начальная точка перемещения над участком.

Таким образом, маршрут должен быть спроектирован так, чтобы БПЛА последовательно посещал все участки и собирал данные. Маршрут робота задается упорядоченным списком концов участков [17].

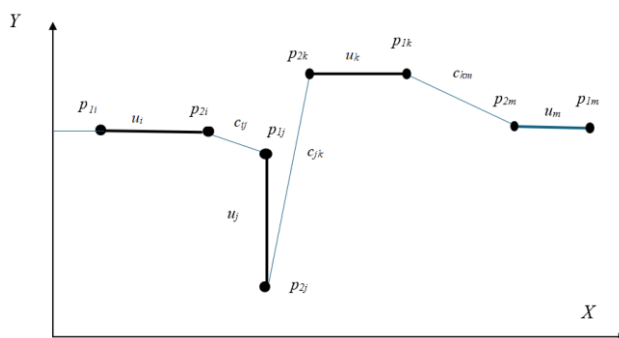


Рис. 5. Формирование маршрута

В состав общей длины S маршрута M входят суммарная длина S_1 рабочих и суммарная длина S_2 холостых отрезков маршрута перемещений робота между рабочими участками. $S = S_1 + S_2$. Суммарная длина S_1 рабочих отрезков маршрута постоянна. Суммарная длина S_2 перемещений робота между участками (холостых отрезков) зависит от порядка обхода участков и варианта стыковки смежных участков в составе маршрута. Используются два режима перемещения робота по маршруту M .

Первый режим заключается в перемещении робота над участком и сопровождается процессом сканирования данных.

Второй режим заключается в перемещении робота между двумя смежными участками в маршруте без сканирования территории.

БПЛА перемещается по прямой и имеет возможность снимать данные, находясь в пределах радиуса радиовидимости. В каждый момент времени t его положение определяется координатами $(x(t), y(t))$.

Суммарная длина непроизводительных перемещений зависит от выбранного маршрута робота.

В данном исследовании предлагается алгоритм, который обеспечивают решение задачи оптимизации траектории методом муравьиной колонии [18].

Для упрощения и повышения эффективности вычислительных процессов вместо двузначной индексации концов (границ) участков автором предложена однозначная индексация. Всего участков – n . На каждом участке две границы (два конца) k^1_i и k^2_i . Следовательно всего $2n$ концов. Представим разбитый на пары список концов в виде упорядоченной последовательности $K^* = k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, \dots, k_{2n-1}, k_{2n}$. Список разбивается на пары: $K^* = (k_1, k_2), (k_3, k_4), (k_5, k_6), \dots, (k_{2n-1}, k_{2n})$. $|K^*| = 2n$.

Двум концам каждого участка u_i соответствует пара (k_b, k_{b+1}) рядом стоящих элементов списка K^* . Причем у первого элемента k_b пары индекс b нечетный, а у второго элемента k_{b+1} пары индекс $(b+1)$ четный. Элемент с нечетным индексом соответствует первому концу участка, а элемент с четным индексом соответствует второму концу участка. Номер i участка определяется как частное от деления индекса второго элемента пары на два. В общем случае конец имеет вид k_{i-} , например, пусть (k_3, k_4) – пара списка K^* . k_3 соответствует первому концу участка u_i , k_4 – второму концу участка u_i , $i=4/2$. Следовательно паре (k_3, k_4) списка K^* соответствует пара концов (k_1^1, k_2^2) ; паре (k_5, k_6) – соответствует пара концов (k_3^1, k_2^2) .

Поиск решения задачи выполняется на полном графе решений $G(X, E)$, где $X=\{x_i | i=1, 2, \dots, 2n\}$ – множество вершин соответствует множеству K^* концов участков, а $E=\{e_{ij} | i=1, 2, \dots, 2n; j=1, 2, \dots, 2n\}$ – множество ребер полного графа, соответствующих отрезкам маршрутов между концами участков [18, 19]. Решение представляется в виде некоторого маршрута M , включающего все вершины на графе решений $G(X, E)$.

Формируется матрица $R=||r_{ij}||_{2n \times 2n}$ расстояний между концами всех участков, где n – число всех участков (рис. 6). Значением элемента r_{ij} является длина расстояния между концами i и j .

Между множеством I_c , $(|I_c|=2n)$ номеров $i \in I_c$ строк матрицы R и множеством имен концов K , $|K|=2n$ устанавливается взаимно однозначное соответствие: $f1: K \rightarrow I_c$, $k=f1(i)$, $i \in I_c$, $k \in K$.

Между множеством J_c , $(|J_c|=2n)$ номеров $j \in J_c$ строк матрицы R и множеством имен концов K , $|K|=2n$ устанавливается взаимно однозначное соответствие: $f2: K \rightarrow J_c$, $k=f2(j)$, $j \in J_c$, $k \in K$, рис. 6. Отметим, что расстояние между двумя концами одного участка принимается равным нулю.

Рассмотрим предлагаемый муравьиный алгоритм построения маршрута передвижения БПЛА.

В начале формируется модель территории. Выбирается стартовый участок. Работа муравьиного алгоритма базируется на использовании коллективной эволюционной памяти (КЭП).

Классическая формулировка муравьиного алгоритма включает процедуру отложения феромона в феромонных точках, в качестве которых обычно служат ребра графов. В качестве коллективной эволюционной памяти (КЭП) используется матрица $\Delta=||\delta_{ij}||_{2n \times 2n}$ в которой для каждого ребра e_{ij} полного графе решений $G(X, E)$, хранится оценка степени пригодности δ_{ij} , определяемая количеством отложенного на ребре феромона.

В начальной части МА для откладывания феромона формируется множество $\Phi=\{\varphi_{ij}\}$ феромонных точек, соответствующих ребрам графа $G(X, E)$. Между Φ и E установлено соответствие $f3: \Phi \rightarrow E$; $\varphi_{ij}=f3(e_{ij})$. $e_{ij} \in E$ – ребро, связывающее концы k_i и k_j участков графа $G(X, E)$. Множество ребер E соответствует множеству связей между концами участков (множество холостых отрезков маршрута).

Матрица $R=||r_{ij}||_{2n \times 2n}$

	i	1		2		3		4		5	
i	k	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2
1	k_1			•	•	•	•	•	•	•	•
	k_2			•	•	•	•	•	•	•	•
2	k_1	•	•			•	•	•	•	•	•
	k_2	•	•			•	•	•	•	•	•
3	k_1	•	•	•	•			•	•	•	•
	k_2	•	•	•	•			•	•	•	•
4	k_1	•	•	•	•	•	•			•	•
	k_2	•	•	•	•	•	•			•	•
5	k_1	•	•	•	•	•	•	•	•		
	k_2	•	•	•	•	•	•	•	•		

Рис. 6. Макет матрицы расстояний между концами всех участков

Процесс поиска решений итерационный. Выполняется в виде двух итерационных процессов – внешнего и внутреннего, вложенного во внешний (рис. 7).

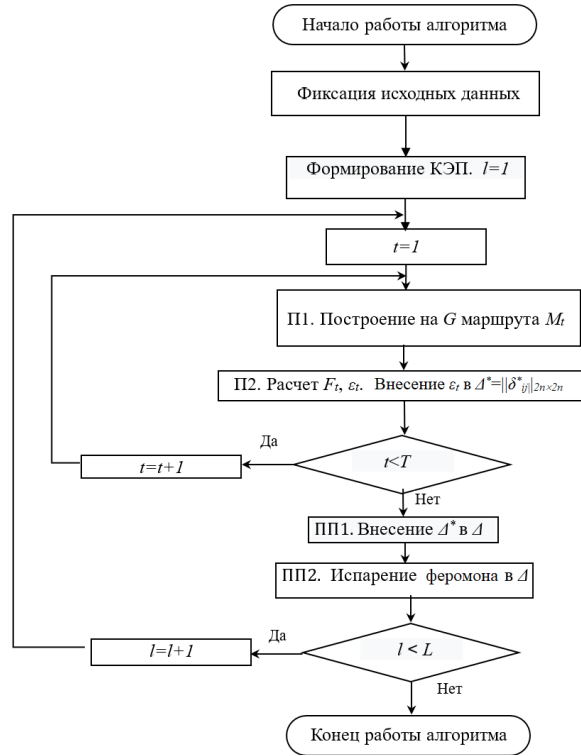


Рис. 7. Структурная схема муравьиного алгоритма

На каждой итерации l внешнего цикла последовательно выполняются процедуры внутреннего цикла и две постпроцедуры ПП1 и ПП2.

На каждой итерации t внутреннего цикла агентом z_t последовательно одна за другой выполняются две процедуры П1 и П2. С помощью процедуры П1 каждый агент z_t строит конструктивным алгоритмом маршрут M_t БПЛА. Определяется множество E_t холостых ребер, входящих в построенный агентом маршрут M_t .

С помощью процедуры П2 агент z_t рассчитывает оценку F_t маршрута M_t и откладывает соответствующее оценке F_t количество феромона ε_t в накопительную матрицу $\Delta^* = ||\delta^*_{ij}||_{2n \times 2n}$ на ребра множества E_t .

В работе используется циклический (ant-cycle) метод муравьиных систем. В этом случае феромон откладывается в ячейки матрицы памяти $\Delta = ||\delta_{ij}||_{2n \times 2n}$, соответствующие ребрам маршрута – после полного формирования всеми агентами решений на текущей итерации l . Для накопления феромона, откладываемого агентами на текущей итерации l , используется накопительная матрица $\Delta^* = ||\delta^*_{ij}||_{2n \times 2n}$, структура которой аналогична структуре матрицы памяти $\Delta = ||\delta_{ij}||_{2n \times 2n}$. Другими словами, в процессе текущей итерации l внешнего цикла каждый агент z_t после построения маршрута по очереди откладывает феромон, соответствующий оценке F_t построенного маршрута, в накопительную матрицу $\Delta^* = ||\delta^*_{ij}||_{2n \times 2n}$, а после завершения итерации внешнего цикла феромон, накопленный всеми агентами в $\Delta^* = ||\delta^*_{ij}||_{2n \times 2n}$, откладывается в матрицу $\Delta = ||\delta_{ij}||_{2n \times 2n}$. Лучшее решение внутреннего цикла запоминается.

После выхода из внутреннего цикла выполняются две постпроцедуры.

Первая постпроцедура ПП1 добавляет в основную матрицу $\Delta = ||\delta_{ij}||_{2n \times 2n}$ КЭП феромон, накопленный в накопительной матрице $\Delta^* = ||\delta^*_{ij}||_{2n \times 2n}$ КЭП.

Второй постпроцедурой ПП2 осуществляется испарение феромона в феромонных точках основной матрицы $\Delta = ||\delta_{ij}||_{2n \times 2n}$.

Макет матрицы памяти представлен на рис. 8. k_i – первый конец отрезка (k_i, k_j) маршрута, k_j – второй конец отрезка, δ_{ij} – количество феромона, отложенного агентами на отрезке маршрута, пропорциональное оценке предпочтения отрезка. Отметим, что δ_{ij} на ребре e_{ij} между двумя концами одного участка принимается равным нулю.

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}
k_1			•	•	•	•	•	•	•	•
k_2			•	•	•	•	•	•	•	•
k_3	•	•			•	•	•	•	•	•
k_4	•	•			•	•	•	•	•	•
k_5	•	•	•	•			•	•	•	•
k_6	•	•	•	•			•	•	•	•
k_7	•	•	•	•	•	•			•	•
k_8	•	•	•	•	•	•			•	•
k_9	•	•	•	•	•	•	•	•		
k_{10}	•	•	•	•	•	•	•	•		

Рис. 8. Макет матрицы $\Delta = ||\delta_{ij}||_{2n \times 2n}$ коллективной эволюционной памяти

Далее формируется модель территории, на базе которой строится маршрут. Исходные данные.

- ♦ K – множество концов k_i^1 и k_i^2 участков.
- ♦ Формируется модифицированное множество K^* всех концов всех участков U . $|K^*| = 2n_u$.
- ♦ Формируется исходная таблица координат позиций, занимаемыми концами участков u_i : для k_i^1 как (x_{1i}, y_{1i}) ; для k_i^2 , как (x_{2i}, y_{2i}) . У всех u_i : $y_{1i} < y_{2i}$; $x_i^1 = x_i^2$, рис. 2.
- ♦ Строится полный граф поиска решений $G(X, E)$, где X множество вершин, соответствующих множеству концов K^* , $(|K^*| = 2n)$ всех участков $U = \{u_i | i = 1, \dots, n_u\}$.
- ♦ В соответствии с топологией территории рассчитывается расстояние r_{ii} между каждой парой концов, принадлежащих различным участкам u_i . Формируется матрица $R = ||r_{ii}||_{2n \times 2n}$.
- ♦ Формируется матрица коллективной эволюционной памяти (КЭП) $\Delta = ||\delta_{ij}||_{2n \times 2n}$.
- ♦ Формируется накопительная матрица $\Delta^* = ||\delta_{ij}^*||_{2n \times 2n}$.
- ♦ Задается число L итераций алгоритма муравьиной колонии.
- ♦ Задается число агентов T .

Представим общую процедуру поиска решения в виде двух алгоритмов: **алгоритм 1** поведения муравьиной колонии; **алгоритм 2** поведения агента.

Алгоритм 1 поведения муравьиной колонии.

1. Всем элементам матрицы $\Delta = ||\delta_{ij}||_{2n \times 2n}$ коллективной эволюционной памяти (КЭП) присваивается начальное значение, равное Ω .
2. Задается число L итераций алгоритма 1.
3. $l = 1$.
4. Выбирается стартовый участок u_μ .
5. Задается число агентов T . $t = 0$, (t – номер агента).
6. Выполняется алгоритм 2.
7. Если $l < L$, то $l = l + 1$ и переход к п. 4 иначе переход к п. 8.
8. Конец работы алгоритма

Алгоритм 2 – поведения агента.

1. $t = 0$. (номер агента).
 2. $t = t + 1$.
 3. Обнуляется накопительная матрица $\Delta^* = ||\delta_{ij}^*||_{2n \times 2n}$.
 4. Формируется начальное множество концов участков $K^{**} = K^*$, не вошедших в маршрут. $M_t = \emptyset$.
 5. $M_t = \{m_{is} | s=0, 1, 2, \dots, 2n\}$. M_t – маршрут агента z_t .
 6. Фиксируется координаты (x_0, y_0) начальной позиция p_0 на стартовой площадке БПЛА. $s=0$. $m_{is} = p_0$.
 7. Выбирается конец $k_b \in K^{**}$, наиболее близкий к позиции p_0 стартовой площадки БПЛА такой, что $S(k_b, p_0) = \min$.
 8. Если b – четное число, то к п. 7, иначе к п. 8.
 9. Если b – четное число, то переход к п. 9, иначе переход к п. 10.
 10. В соответствии с правилами одно знаковой индексации, индекс участка $i=b \setminus 2$. Конец k_b рассматривается как входной на участок u_i . $s=s+1$. $m_{is} = k_b$. $K^{**} = K^{**} \setminus k_b$. Выходным концом участка u_i является конец k_{b-1} . $s=s+1$. $m_{is} = k_{b-1}$. $K^{**} = K^{**} \setminus k_{b-1}$. $k_b \leftrightarrow k_i^1$. $k_{b-1} \leftrightarrow k_i^1$. Конец k_{b-1} объявляется аттрактором. Фиксируется индекс конца k_{b-1} , объявленного аттрактором, $a=b-1$. Переход к п. 10.
 11. Если b – нечетное число, то в соответствии с правилами одно знаковой индексации, индекс участка $i=b+1 \setminus 2$. Входным концом участка u_i является конец k_b . $s=s+1$. $m_{is} = k_b$. $K^{**} = K^{**} \setminus k_b$. Выходным концом участка u_i является второй конец k_{b+1} . $s=s+1$. $m_{is} = k_{b+1}$. $K^{**} = K^{**} \setminus k_{b+1}$. $k_b \leftrightarrow k_i^1$, $k_{b+1} \leftrightarrow k_i^2$. Конец k_{b+1} объявляется концом – аттрактором. Фиксируется индекс конца k_{b+1} , объявленного аттрактором. $a = b+1$.
 12. Если $K^{**} = \emptyset$, то переход к п. 16, иначе переход к п. 12.
 13. На графе G формируется набор ребер $E_a \in E$, связывающих вершину $x_a \in X$, соответствующую концу k_a , с вершинами $x_v \in X^{**}$, $X^{**} \subset X$, соответствующих K^{**} .
 14. Определяется стоимость $\xi_{av} = \alpha \delta_{av} + \beta r_{av}$ каждого ребра $e_{av} \in E_a$, где α, β – коэффициенты. Параметр δ_{av} извлекается из матрицы памяти $\Delta = ||\delta_{ij}||_{2n \times 2n}$. r_{av} – из матрицы $R = ||r_{ij}||_{2n \times 2n}$. Соотношение между значениями α и β находится экспериментально.
 15. Вероятность P_{av} включения ребра $e_{av} \in E_a$ в формируемый маршрут определяется следующим соотношением $P_{av} = \xi_{av} / \sum_v \xi_{av}$.
 16. Агент с вероятностью P_{av} выбирает одно из ребер $e_{av} \in E_a$, которое связывает конец k_a с концом k_v .
 17. Фиксируется индекс конца k_v . $b=v$. Переход к п. 7.
 18. Маршрут M_t построен. Формируется множество холостых ребер $E_t \in E$ графа G , вошедших в состав маршрута M_t .
 19. Определяется суммарная длина F_t множества E_t холостых отрезков, входящих в состав маршрута M_t . F_t – оценка маршрута M_t .
 20. В ячейки накопительной матрицы $\Delta^* = ||\delta_{ij}^*||_{2n \times 2n}$, соответствующие всем холостым отрезкам маршрута M_t , добавляется порция феромона в количестве $\tau_t = \mu F_t$, где μ – коэффициент, находится экспериментально.
 21. Если $t < T$, то переход к п. 2, иначе переход к п. 20.
 22. После того, как все агенты сформировали решения и добавили каждый из них свою порцию феромона в накопительную матрицу $\Delta^* = ||\delta_{ij}^*||_{n \times n}$, производится сложение матриц $\Delta = ||\delta_{ij}||_{n \times n}$ и $\Delta^* = ||\delta_{ij}^*||_{n \times n}$. $\Delta = \Delta + \Delta^*$.
 23. На третьем этапе итерации происходит общее испарение феромона на ребрах полного графа R (соответственно в ячейках матрицы Δ КЭП) в соответствии с формулой $\tau_k = \tau_k(1-\rho)$, где ρ – коэффициент обновления.
 24. Среди решений, полученных агентами на текущей итерации l , выбирается лучшее, которое запоминается.
 25. Конец работы алгоритма 2.
- Временная сложность этого алгоритма зависит от времени жизни колонии l (число итераций), количества вершин графа n и числа агентов m , и определяется как $O(l \cdot n^2 \cdot m)$.

Разработка блока управления полетом по заданному маршруту в автоматическом режиме. Приведём теперь кинематическую модель мобильного робота, а также разработанный метод управления его движением вдоль произвольного маршрута [20].

На рис. 9 представлено расположения мобильного робота R_i в абсолютной системе координат OXY и связанная с R_i система координат $O_i X_i Y_i$.

Известен вектор $\mathbf{V}_i = (x_i, y_i, \varphi_i, V_i)$ состояния робота R_i в абсолютной системе координат. В скобках – $(x_i, y_i, \varphi_i, V_i)$ положение и ориентация робота в абсолютной системе координат, и линейная скорость робота соответственно.

Основные результаты исследования связаны с разработкой позиционно-траекторного регулятора ((ПТР). ПТР – это система управления, которая обеспечивает перемещение объекта по заданному маршруту, контролируя его положение в пространстве. Он работает, сравнивая текущее положение объекта с желаемым положением на маршруте и выдает управляющие воздействия, чтобы минимизировать ошибку. Результатом данной работы является разработка полностью децентрализованного правила управления мобильным роботом [5, 7, 17].

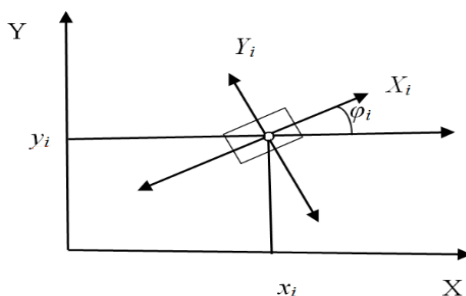


Рис. 9. Координаты мобильного робота

Предусматривается разработка и исследование новых парадигм на основе интеграции моделей адаптивного поведения биологических систем для решения задач мониторинга, разведки и рекогносцировки (для беспилотных летательных аппаратов, роботов **военного** назначения).

Для функционирования системы управления движением мобильного робота необходима информация о его положении относительно окружающей среды. Разработанные алгоритмы управления должны позволять роботу изменять направление движения для исключения столкновений с другими, что повысит маневренность при скоростном передвижении роя роботов [21].

Разработан алгоритм управления перемещением БПЛА на каждом отрезке маршрута от одной опорной точки к другой, обеспечивающий минимальное отклонение от опорной траектории. Для фиксации отклонений должны использоваться датчики системы технического зрения, например, лазерный дальномер со сканирующим лучом [4, 9, 18].

Маршрут состоит из чередующейся последовательности рабочих и холостых отрезков, каждый из которых ограничен опорными точками соответствующих конечных вершин участков. Облет отрезка маршрута всегда начинается с одного конца до другого. На каждом отрезке БПЛА выполняет перемещение по алгоритму, включающему одни и те же правила.

Блок управления перемещением БПЛА между опорными точками: из точки k_a в точку k_b . БПЛА перемещается в трехмерном пространстве на постоянной высоте D . Рассмотрим процесс управляемого перелета летательного аппарата между опорными точками k_a и k_b соответствующими опорным точкам p_a и h_b БПЛА. Фиксируются в двумерной системе координат OXY координаты опорных точек k_a и k_b : (x_a, y_a) и (x_b, y_b) , (рис. 10).

Формируется задающий направление перемещения робота опорный вектор F , связывающий точки k_a и k_b , (рис. 10). Определяется угол α между вектором F и осью абсцисс OX .

БПЛА занимает начальную позицию опорной точки k_a с координатами (x_a, y_a) и разворачивается так, что в точке k_a вектор скорости V БПЛА совпадает с вектором F , а модуль h вектора V в начальной позиции равен нулю.

Обозначим угол между векторами F и V как ω , расстояние между F и V . В начальной позиции $\omega=0$.

Перемещение БПЛА начинается после завершения разворота. На маршруте (k_a, k_b) фиксируются точки (o_1, o_2) (рис. 10). БПЛА перемещается от точки k_a к точке o_1 с ускорением a . При этом $\omega=0$.

После прибытия за время t_1 в точку o_1 скорость БПЛА достигнет значения $h=a \cdot t_1$. БПЛА продолжает перемещаться со постоянной скоростью h до точки o_2 .

Начиная с точки o_2 производится равнозамедленное движение (торможение) до точки k_b со скоростью $h_1 = h - a \cdot t^2/2$. В точке k_b скорость $h_1=0$. Значения отрезков (k_a, o_1) , (o_1, o_2) , (o_2, k_b) и значение ускорения a задаются в соответствии с техническими характеристиками БПЛА.

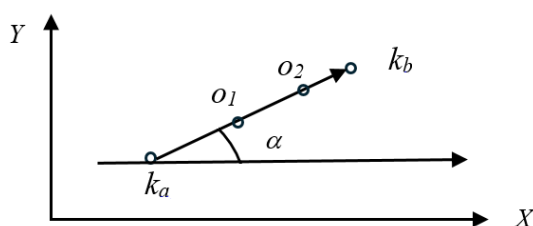


Рис. 10. Перемещение БПЛА на отрезке маршрута

При перемещении БПЛА возможны его столкновения с посторонними объектами. Наиболее эффективным способом исключения столкновения с объектом во время полета – это изменение высоты полета БПЛА с последующим возвратом на рабочую высоту («нырок» или «подпрыгивание»). Возможно торможение или уклонение от столкновения путем смещения траектории вправо или влево. Для этого необходимы сенсоры, анализирующие состояния окружающего пространства. В качестве объекта столкновения могут быть БПЛА или высотные сооружения. Возникает проблема выбора наиболее эффективного маневра избежания столкновений [3, 8, 22].

В работе предложена структуры маневров, выполняемого БПЛА для коррекции отклонений параметров, заключающаяся в следующем. Сначала БПЛА R_i изменяет значение параметра $p_i(t)$ на величину δ_i , затем в течение времени δ_i БПЛА передвигается с новым значением параметра $p^*_i(t)=p_i(t)+\delta_i$. По истечении времени δ_i БПЛА возвращается на маршрут с исходным значением параметра, с которым БПЛА продолжает движение.

Если маневр уклонения от столкновений выполнялся при перемещении между участками на холостом отрезке маршрута, процесс перемещения продолжается. При этом реализуется стратегия скорейшего возвращения робота на маршрут.

Если маневр уклонения от столкновений выполнялся при сканировании участка, процесс сканирования участка необходимо повторить. При этом робот должен вернуть в точку маршрута, предшествующую точке схода с маршрута.

Далее робот под управлением регулятора отслеживает программную траекторию движения робота от одной опорной точки к другой. Для реализации программной траектории используются датчики системы технического зрения, например, лазерный дальномер со сканирующим лучом [20].

Основной задачей управления является организованное воздействие на объект управления (ОУ), в качестве которого выступает БПЛА или иная техническая система, которая переводит объект в требуемое состояние. Объектом управления является БПЛА, адаптивным устройством управления – специальная подсистема адаптации (рис. 11), БО – блок оценок.

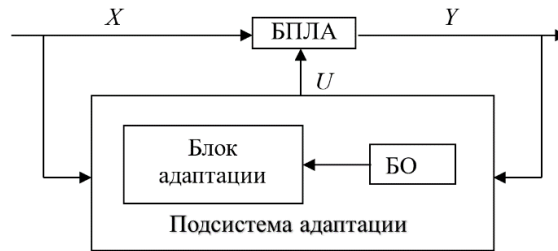
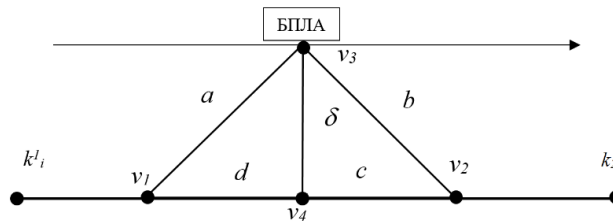


Рис. 11. Специальная подсистема адаптации

Известен вектор $V=(x, y, \varphi, v)$ состояния БПЛА в абсолютной системе координат, где (x, y) – координаты места расположения БПЛА, V – скорость передвижения робота, φ – угол между вектором V и базовой линией Line, h – модуль вектора V . Заданы для БПЛА расстояние D между БПЛА и опорной линией.

Если существуют отклонения: $\varepsilon_h=h_i(t)-h_{i-1}(t)$, $\varepsilon_y=y_i(t)-y_{i-1}(t)$, $\varepsilon_x=x_i(t)-x_{i-1}(t)$, $\varepsilon_h=h_i(t)-h_{i1}(t)$, $\varphi_i(t)>0$, то выполняется адаптивная коррекция. Цель коррекции – минимизация разности $(|\varepsilon_x|-D)$, минимального отклонения от опорной траектории. Ошибкой БПЛА R_i является: $\delta_{Si}=S_i(t)-S_0$, $\omega_{i,i-1}(t)>0$, δx_i , δy_i – отклонения базовой точки.

По середине каждого участка $u_i \in U$ двумя концами k_{1i} и k_{2i} проводится виртуальная опорная линия l_i . Опорная линия l_i служит ориентиром для БПЛА, при перемещении вдоль линии от одного конца участка к другому, в целях полного покрытия участка сигналом сенсора БПЛА. Робот при перемещении вдоль участка не должен отступать от опорной линии на величину больше δ , для полного охвата площади участка, рис. 12.

Рис. 12. Отклонение БПЛА от опорной линии l_i

Расчет величины δ отклонения БПЛА от опорной линии $k_{1i}-k_{2j}$ выполняется следующим образом. Фиксируются координаты точек k_{1i} . В момент времени t БПЛА находится в точке v_3 с координатами (x,y) . На опорной линии $k_{1i}-k_{2j}$ выбираются две точки v_1 и v_2 и определяются их координаты (x_1, y_1) и (x_2, y_2) . Рассчитываются координаты (x_4, y_4) точки v_4 , расположенной на линии посередине между точками v_1 и v_2 .

Из точки v_3 опускается перпендикуляр в точку v_4 . Считаем, что отрезок δ перпендикулярен опорной линии. Дальнейшие рассуждения справедливы только с учетом того, что отрезок δ перпендикулярен опорной линии.

По координатам точек v_1, v_2, v_3 рассчитывается длина $\underline{a}$ отрезков между точками v_1 и v_3 , $\underline{b}$ между точками v_2 и v_3 и $\underline{f}$ между точками v_1 и v_2 . $\underline{f} = d + c$.

Далее с использованием теоремы Пифагора рассчитывается длина отрезка $\underline{d}$ – между точками v_1 и v_4 , и отрезка $\underline{c}$ – между точками v_2 и v_4 , и отклонение $\underline{\delta}$.

Процесс перемещения БПЛА в реальных условиях поддерживается блоком адаптации. Строится опорный вектор, связывающий два связываемых конца k_{1i} и k_{2i} . Задача блока адаптации обеспечить перемещение БПЛА вдоль опорной линии.

Процесс поиска решения реализуется в виде адаптивной системы, работающей на основе моделирования поведения автомата адаптации. Основными компонентами адаптивной системы являются: внешняя среда, объект адаптации и общая структура процесса адаптации [16].

Под воздействием случайных факторов внешней среды возможны отклонения БПЛА от заданного маршрута. В нашем случае в качестве объекта адаптации служит БПЛА. Процесс перемещения БПЛА в реальных условиях поддерживается блоком адаптации. Задача блока адаптации обеспечить перемещение БПЛА по заданному маршруту.

Основные цели адаптации связаны с экстремальными требованиями, предъявляемыми к объекту адаптации в виде максимизации эффективности его функционирования. Процесс адаптации может выполняться некоторыми наборами альтернативных процедур и их последовательностей. Выбор той или иной процедуры осуществляется с помощью некоторого алгоритма на основе информации, полученной после анализа исходного задания. Этот вид адаптации отличается наличием поиска – специально организованного процесса, позволяющего определить необходимое адаптирующее воздействие. Процесс *поисковой* адаптации имеет последовательный многоэтапный характер, реализуется как последовательность управляющих воздействий с учетом промежуточных результатов, полученных на отдельных этапах [16, 18, 20].

В нашем случае в качестве объекта адаптации служат набор параметров $P=\{p_i|i=1,\dots,n_p\}$ непрерывного управления полетом. p_1 – отклонение БПЛА от опорной линии, $p_1=d$, p_2 – угол между вектором перемещения БПЛА и опорной линией текущего участка, $p_2=\varphi$, p – высота полета БПЛА над текущим участком, $p_3=h$.

Способ управления заключается в том, чтобы в процессе движения в каждый момент времени t производился перепланирование параметров движения БПЛА R_i , движущегося параллельно к опорному вектору. Ошибкой БПЛА R_i является:

$$\delta i=k_1(|D-(x_i(t)-x_{i-1}(t))|+k_2|(y_i(t)-y_{i-1}(t))|+k_3|(h_i(t)-h_{i-1}(t))|+k_4|(\alpha_i(t)-\alpha_0)|).$$

Ошибка перемещения роботов: $\Delta=\sum_i \delta_i$.

Адаптация БПЛА сводится к адаптации значений параметров управления. В работе предлагается подход к изменению значений параметров на основе метода альтернативной адаптации.

Каждому адаптивному параметру p_i соответствует автомат адаптации A_i , под управлением которого производится адаптивное изменение значения p .

Сложившаяся ситуация характеризуется двумя факторами: состоянием среды, в которой находится объект, и самим объектом адаптации. Процесс поисковой адаптации имеет последовательный многоэтапный характер, на каждом этапе которого определяется адаптирующее воздействие на объект, повышающее его эффективность и оптимизирующее критерии качества [16–18].

Объектами адаптации являются адаптивные параметры управления движением БПЛА. Состоянию параметра в среде соответствует его значение h_i .

Адаптивная система представляется в виде коллектива параметров.

Управление процессом адаптации каждого p_i выполняется автоматом адаптации (АА) A_i , моделирующим поведение объекта в среде, где i – номер параметра.

Автомат адаптации способен воспринимать два входных сигнала: «поощрения» при реализации удачной альтернативы (+) и «наказания» при реализации неудачной альтернативы (-). Под действием этих сигналов осуществляется переход АА в новые состояния. Переходы между состояниями показаны ориентированными ребрами, помеченными входными сигналами (+), (-). В зависимости от состояния АА на его выходе может быть одна из выходных альтернатив (процедур) – сигналов A_1, A_2, A_3 .

V_1 – уменьшение значения h_i на величину ε ;

V_2 – оставить значение параметра без изменений;

V_3 – увеличение значения параметра на величину ε .

С системной точки зрения адаптация представляет собой процесс непрерывной оптимизации. Целью адаптации является нахождение состояния объекта адаптации в среде, обеспечивающего получения наибольшего значения показателя качества F . Важной проблемой является методика выбора автоматом адаптации АА альтернативного адаптирующего воздействия на объект оптимизации.

Первоначально АА находится в одном из начальных состояний. Состояниям АА соответствуют альтернативы, реализацию некоторых процедур над объектом адаптации предписывающих (увеличить, уменьшить, не изменять) значение параметра.

Фиксируются целевые значения объектов адаптации (целевые значения параметров вектора V_i).

На каждом этапе действия выполняются за пять тактов.

На первом такте адаптации фиксируются **состояния объектов адаптации** (текущие значения параметров), которые сравниваются с целевыми значениями.

На втором такте определяется **стремление параметра к изменению** текущего значения (увеличить, уменьшить, не изменять), для уменьшения различия с целевым значением.

На третьем такте вырабатывается управляющий сигнал (отклик среды) «наказание» (-), если **стремление объекта к изменению** не совпадает **предписанием** АА; «поощрение» (+) в противном случае.

На четвертом такте в каждом автомате адаптации a_i под действием подаваемого на его вход отклика q_i осуществляется переход в новое состояние.

На пятом такте для каждого объекта адаптации реализуется альтернатива, предписывающая тип изменения значения параметра, в соответствии с выходами АА.

Для реализации механизма адаптации параметрам вектора $V = (x, y, \varphi, V)$ состояния робота R в абсолютной системе координат сопоставляется автоматы адаптации (АА) (a^x, a^y, a^φ, a^V) моделирующие поведение объектов адаптации R в среде.

Автомат адаптации A_i , представленный на рис. 13, имеет три группы состояний S_i^1, S_i^2, S_i^3 , соответствующие трем альтернативам изменения значения h_i параметра, и одно промежуточное состояние $\leftrightarrow$.

Если АА находится в одном из состояний группы S_i^k , то реализуется альтернатива (адаптирующее воздействие) V_k .

Состояния группы S_i^1 соответствуют альтернативе V_1 (намерению) увеличения значения параметра на величину ε .

Состояния группы S_i^2 соответствуют альтернативе V_2 отсутствия намерения изменения значения h_i параметра.

Состояния группы S_i^3 соответствуют альтернативе V_3 (намерению) уменьшения значения h_{il} гена g_{il} на величину ε .

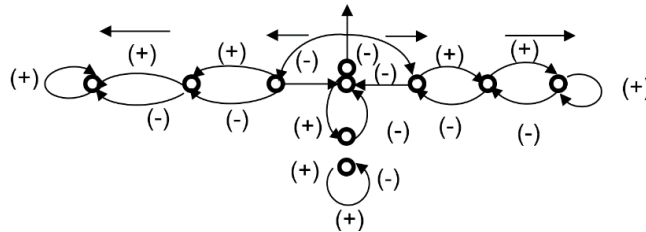


Рис. 13. Граф-схема переходов автомата адаптации

Число состояний АА в каждой группе S_i^k задается параметром α_i^k , называемым глубиной памяти или «степенью доверия», где k – номер группы.

На рис. 13 $\forall k$ ($\alpha_i^k=3$). s_{ic}^k – номер текущего состояния АА меняется в интервале $\langle 3, 2, 1, 0, 0, -1, -2, -3 \rangle$. Группа S_i^1 включает состояния с номерами $\langle 3, 2, 1 \rangle$. Группа S_i^2 включает состояния с номерами $\langle 0, 3, 0, 2, 0, 1 \rangle$. Группа S_i^3 включает состояния с номерами $\langle -1, -2, -3 \rangle$.

Переход АА из одной группы состояний к другой происходит в циклической последовательности $\dots \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \rightarrow S_1 \rightarrow \dots$.

Особенностью представленного АА является то, что изменение направления перемещения осуществляется через нейтральное положение. С другой стороны, это может быть тормозом и замедлять процесс изменения направления перемещения в процессе адаптации.

Задача адаптации состоит в том, чтобы сформировать в автомате адаптации последовательность адаптирующих воздействий U , экстремизирующих показатели качества F получаемых решений (критерии адаптации).

В состав каждого АА входит индикатор состояния автомата адаптации. Значения индикатора изменяются от $+N1$ до $-N2$. Если значение индикатора по убыванию в пределах от $+N1$ до $+1$, то реализуется первая альтернатива. Если значение индикатора по возрастанию от $-N1$ до -1 , то реализуется вторая альтернатива.

Изменение значения параметра π в соответствии со структурой АА выполняется по действием управляющего сигнала U . Управляющий сигнал U может иметь два значения $\{+1, -1\}$. Для $N1 = +3, N2 = -3$ шкала S значений параметра π имеет вид:

$S = \langle 3, 2, 1, -1, -2, -3 \rangle$. Пусть $U = +1$, тогда если $N1 > \pi(t) \wedge 1$, то $\pi(t+1) = \pi(t) + 1$;

Если $\pi(t) = N1$, то $\pi(t+1) = N1$; если $\pi(t) = -1$, то $\pi(t+1) = +1$.

Пусть $U = -1$, тогда: если $-1 \wedge \pi(t) > N2$, то $\pi(t+1) = \pi(t) - 1$; если $\pi(t) = N2$, то $\pi(t+1) = N2$; если $\pi(t) = 1$, то $\pi(t+1) = -1$.

Рассмотрим работу АА.

1. Задаются начальные значения h_i параметров БПЛА.

2. Задаются значения параметров АА управления движением:

♦ m – число альтернатив (групп состояний АА);

♦ α_i^k – число состояний в группе S_i^k (степень доверия).

3. Задается начальное состояние $s_{ic}^k \in S_i^k$ для каждого АА A_i .

4. $t=0, i=0$.

В последующем на каждом шаге (итерации) t работа адаптивного алгоритма выполняется за четыре такта. По своей сути эти четыре такта соответствуют второму, третьему и четвертому этапу процесса адаптации живых систем.

5. $t=t+1$. (номер итерации).

6. $i=i+1$. (номер параметра).

7. На первом такте расчет значения h_i параметра и состояние $s_{ij} \in S_i$ автомата адаптации A_i .

8. На втором такте по значению параметр p_i оценивается состояние объекта адаптации в среде $\delta_i = \text{sgn}[h^{**} - h_i]$, где $\text{sgn}[y]$ – функция знака числа: $\text{sgn}(y)=1$, если $y>0$; $\text{sgn}(y)=0$, если $y=0$; $\text{sgn}(y)=-1$, если $y<0$.

9. Если $\delta_i=1$ или $\delta_i=0$, то объект адаптации – параметр p_i в удовлетворительном состоянии. На основании этого вырабатывается управляющий сигнал $u(+)$ поощрения или (+).

10. Если $\delta_i=-1$, то объект адаптации – параметр p_i в неудовлетворительном состоянии. На основании этого вырабатывается управляющий сигнал $u(-)$ наказания или (-).

11. На третьем такте под действием управляющего сигнала u автомат адаптации A_i переходит в новое состояние $s_{ic}^k \in S_i^k$.

12. На четвертом такте реализуется альтернатива V_k , соответствующая группе состояний S_i^k автомата адаптации A_{ii} .

13. Если $i < n$, то переход к пункту 6, иначе переход к пункту 15.

14. Если $t < T$, то переход к пункту 5, иначе переход к пункту 15.

15. Конец работы алгоритма

Максимальные значения отклонения скорости $\delta V = (V_i(t+1) - V_i(t))$ – и угла «рыскания» $\varphi_{i,i-1}(t+1) - \varphi_i(t) = \alpha_i(t) - \alpha_{i-1}(t)$ устанавливаются системой управления в допустимых пределах.

Разработаны правила устранения расхождения курса робота R_i с курсом робота R_{i-1} .

Если существуют отклонения: $\varepsilon_h = h_i(t) - h_{i-1}(t)$, $\varepsilon_y = y_i(t) - y_{i-1}(t)$, $\varepsilon_x = x_i(t) - x_{i-1}(t)$, $\varepsilon_h = h_i(t) - h_{i-1}(t)$, $\varphi_i(t) > 0$, то выполняется коррекция. Цель коррекции – минимизация разности $(|\varepsilon_x| - D)$.

Задача адаптации состоит в том, чтобы сформировать в автомате адаптации последовательность адаптирующих воздействий U , экстремизирующих показатели качества $F \rightarrow$ получаемых решений (критерии адаптации).

Авторами предложена структуры маневров, выполняемого БПЛА для коррекции отклонений параметров, заключающаяся в следующем. Сначала БПЛА R_i изменяет значение параметра $a_i(t)$ на величину δ_i , затем в течение времени δ_i БПЛА передвигается с новым значением параметра $a_i^*(t) = a_i(t) + \delta_i$. По истечении времени δ_i возвращается исходное значение параметра, с которым БПЛА продолжает движение.

Экспериментальные исследования. Для подтверждения эффективности разработанного алгоритма, а также проведения вычислительного эксперимента был разработан программный комплекс, позволяющий решать определенного класса задачи связанных с интеллектуальным планированием траекторий подвижных объектов в трехмерных неопределенных средах с препятствиями [14, 19].

Основной целью экспериментального исследования является анализ целевых функций, проверка теоретических оценок временной и пространственной сложности алгоритмов (ВСА и ПСА) и определение оптимальных параметров, при которых алгоритмы находят глобальные или близкие к нему решения [14, 16].

Первая часть исследований посвящена исследованию на одной популяции механизмов муравьиной колонии для задачи мониторинга некоторой территории. Для этого исследовалось влияние управляющих параметров, таких как: объем популяции, количество итераций, начальное количество феромона, откладываемого на ребрах графов и т.д. В результате определялось такое сочетание значений этих параметров, которое обеспечивает наивысшую эффективность адаптивных процедур для задачи мониторинга некоторой территории [2, 20, 22].

На основе результатов экспериментальных исследований была построена средняя зависимость степени качества от числа итераций (рис. 14).

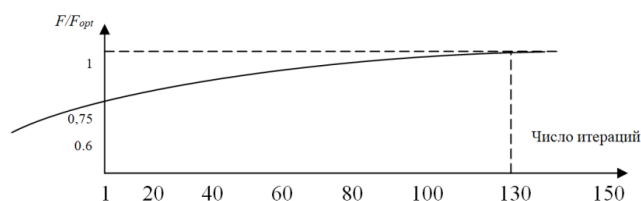


Рис. 14. Зависимость степени качества алгоритма от числа итераций

Каждый пример тестировался на 50 независимых прогонах. При исследовании сходимости алгоритмов для каждого эксперимента запоминался номер генерации, после которой не наблюдалось улучшения оценки. В каждой серии из 50 испытаний определялись среднее значение числа генераций, после которого не наблюдалось улучшения оценки. Для каждой серии испытаний определялось лучшее решение. На основе обработки экспериментальных исследований для алгоритмов была построена средняя зависимость качества решений от числа итераций.

Исследования показали, что число итераций, при которых алгоритм находил лучшее решение, лежит в пределах 120–135. Алгоритм сходится в среднем на 130 итерации. В среднем запуск программы обеспечивает нахождения решения, отличающегося от оптимального менее, чем на 2%. Временная сложность алгоритма при фиксированных значениях M – размер популяции роя и T – число итераций лежит в пределах $O(n)$. Общая оценка временной сложности лежит в пределах $O(n^2)$ – $O(n^3)$.

Для сравнения эффективности разработанного алгоритма мониторинга территории, были использованы 3D-бенчмарки:

- ♦ AirSim Simulation Environments (<https://microsoft.github.io/AirSim/settings>). Продвинутое симулятор для БПЛА от Microsoft, построенный на Unreal Engine. Предоставляет фотореалистичные 3D-окружения (природные ландшафты) с высокой физической точностью. Является основным источником бенчмарков для исследований в области планирования траекторий БПЛА, учитывающих динамику, компьютерное зрение и неопределенность [18, 23].

♦ The UZH-FPV Drone Racing Dataset (<https://fpv.ifi.uzh.ch/datasets>). Этот датасет содержит высокоточные данные о траекториях, позах и 3D-модели трассы. Используется как бенчмарк для агрессивного и высокоскоростного планирования траекторий БПЛА, где ключевую роль играет динамика и минимальное время прохождения.

♦ IROS / ICRA Robotics Challenge Datasets (<https://www.mbzirc.com/grand-challenge>). Материалы крупнейших международных робототехнических соревнований (MBZIRC, DARPA SubT, IROS Drone Racing) служат источником сложных прикладных бенчмарков. Эти сценарии представляют собой тестирования, объединяя планирование, восприятие и управление в условиях неопределенности [15, 20, 23].

Для сравнения качества решений задачи мониторинга территории использовались стандартные тесты (бенчмарки) [20, 22]. Результаты сравнивались с результатами работы существующих алгоритмов, описанных в литературных источниках [15, 23].

В табл. 1 представлены результаты, полученные различными алгоритмами, а также показаны результаты работы разработанного роевого алгоритма мониторинга территорий (рассматриваемый алгоритм).

Из табл. 1 видно, что разработанный алгоритм работает на 10-16 % лучше аналогов.

Графики сравнения качества решения разработанного гибридного алгоритма мониторинга территории (12), метода диаграмм Вороного (2), генетического поиска без картографии (8) и метода планирования с использованием неустойчивых режимов (10), представлены на рис. 15.

Из рис. 15 видно, что разработанный алгоритм и другие, используемые для сравнения алгоритмы, позволяют получить решение, близкое к оптимальному.

Однако разработанный гибридный алгоритм мониторинга территории на основе метода муравьиной колонии и коллективной адаптации обладает большим быстродействием, в том смысле, что для достижения высокого результата требуется меньшее число итераций.

Таблица 1

Результаты сравнительных экспериментов

№№	Методы	Критерии			
		S_m	P_L	t_m	F
1	Метод потенциальных полей	0,105	0,01988	0,01593	0,6
2	Метод диаграмм Вороного	0,44	0,02052	0,01728	0,6
3	Метод реактивной навигации	0,667	0,02421	0,02473	0,8
4	Метод управления с применением нечетких систем	0,4971	0,02511	0,01253	1,0
5	DVN-метод в классическом базисе	0,070	0,0321	0,07007	1,0
6	DVN-метод в базисе формальных нейронов	0,071	0,0317	0,07007	1,0
7	Нейросетевой гибридный метод	0,081	0,0321	0,03796	1,0
8	Генетический поиск без картографии	0,082	0,01349	0,01105	0,4
9	Генетический поиск с картографией	0,5681	0,03089	0,02381	1,0
10	Метод планирования с использованием неустойчивых режимов	0,2981	0,02041	0,01964	0,8
11	Комбинированный метод планирования с использованием неустойчивых режимов и виртуальной целевой точки	0,838	0,02581	0,01669	1,0
12	Разработанный алгоритм	0,3567	0,02025	0,01102	1,0

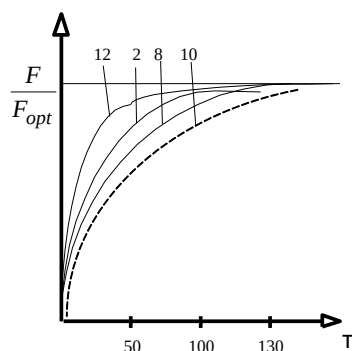


Рис. 15. Графики сравнения качества решения

В результате проведенных исследований было установлено, что предложенная модернизированная методика пошагового проектирования маршрута позволила повысить эффективность решения, что подтверждено результатами экспериментальных исследований. Анализ показал, что значительное влияние на улучшение характеристик проектов оказало использование методов поисковой оптимизации.

Заключение. В работе рассматриваются методы формирования минимального набора участков, полностью покрывающих доступную территорию, подвергаемую исследованиям датчиками БПЛА.

Разработана методология и алгоритм построения на основе метода муравьиной колонии маршрута перемещений БПЛА при исследовании территории.

Разработаны механизмы управления перемещениями БПЛА по маршруту.

Предложенные новая методика и метод построения модели исследуемой территории, в виде разрозненного множества участков, имеющих форму прямоугольников одинаковой ширины и их упорядоченное расположение, что позволяет минимизировать общую длину маршрута БПЛА и общее время сканирования участков.

Повышение эффективности управления автономными подвижными объектами в процессе мониторинга местности в неопределенной динамической среде достигнуто за счет алгоритмов на основе методов поисковой оптимизации.

Способ управления заключается в том, чтобы в процессе движения БПЛА в каждый момент времени производится перепланирование параметров движения БПЛА, движущегося параллельно к опорному вектору.

В работе предлагается подход к изменению значений параметров на основе метода альтернативной адаптации. Изменение параметров заключается в уменьшении различия между текущим и программным значениями.

Применение всех разработанных авторами методов, моделей и алгоритмов управления даст возможность создавать интеллектуальные системы управления автономными подвижными объектами в процессе мониторинга местности в неопределенной динамической среде.

Источником усовершенствования может быть более детальная проработка вопросов, связанных с разработкой структуры маневров, выполняемых БПЛА для коррекции отклонений параметров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ногин А.А. Основные элементы структурной архитектуры сенсорных узлов // Научный журнал. – 2018. – № 5 (28). – С. 37-39.
2. Марков А.В., Симаньков В.И. Методика расчета траекторий полета беспилотных летательных аппаратов для наблюдения за местностью // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2019. – № 4 (122). – С. 57-63.
3. Ци Ч. Исследование планирования траектории роторного БПЛА для распыления пестицидов // StudNet. – 2021. – Т. 4, № 7. – С. 654-669.

4. Родионов А.С., Маткурбанов Т.А., Хайруллаев У.Б. Оптимизация траектории полета БПЛА для мониторинга сельскохозяйственных земель // Проблемы информатики. – 2025. – № 1 (66). – С. 5-17.
5. Stefan N., Plonski P.A., Isler V. Approximation algorithms for tours of orientation varying view cones // The International Journal of Robotics Research. – 2020. – Vol. 39, No. 4. – P. 389-401.
6. Родионов А.С., Маткурбанов Т.А. Планирование траектории полета БПЛА при мониторинге большой области // Информатика и автоматизация. – 2025. – Т. 24 (3). – С. 791-827.
7. Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю., Костюков В.А., Хуссейн Ф., Кадим А. Алгоритмы планирования траекторий в двумерной среде с препятствиями // Информатика и автоматизация. – 2022. – Т. 21 (3). – С. 459-492.
8. Костюков В.А., Медведев М.Ю., Пилюхов В.Х. Планирование движения наземных роботов в среде с препятствиями: алгоритмы построения траекторий в группе при заданном шаблоне // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2023. – Т. 24, № 1. – С. 33-45.
9. Liu B., Xiao X., Stone P. A Lifelong Learning Approach to Mobile Robot Navigation // In IEEE Robotics and Automation Letters. – 2021. – Vol. 6 (2). – P. 1090-1096.
10. Pradhan S., Mandava R.K., Vundavilli P.R. Development of path planning algorithm for biped robot using combined multi-point RRT and visibility graph // International Journal of Information Technology. – 2021. – Vol. 13. – P. 1513-1519.
11. Kamil A.R.M., Shithil S.M., Ismail Z.H., Mahmud M.S.A., Faudzi A.A.M. Path Planning Based on Inflated Medial Axis and Probabilistic Roadmap for Duct Environment // Lecture Notes in Electrical Engineering. – Springer, Singapore, 2022. – Vol. 834.
12. Chen G., Luo N., Liu D., Zhao Z., Liang Ch. Path planning for manipulators based on an improved probabilistic roadmap method // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2021. – Vol. 72.
13. Janos J., Vonasek V., Penicka R. Multi-Goal Path Planning Using Multiple Random Trees // IEEE Robotics and Automation Letter. – 2021. – Vol. 6 (2). – P. 4201-4208.
14. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Бесхмельнов М.И. Моделирование построения траектории подвижного объекта на основе методов многокритериальной оптимизации // Вестник Тверского государственного технического университета. Технические науки. – 2025. – № 3 (27). – С. 103-119.
15. Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю. Сравнительный анализ централизованного и децентрализованного алгоритмов движения строем БЛА мультикоптерного типа // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1 (225). – С. 121-139.
16. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Бесхмельнов М.И. Автономная мультиагентная система управления группой роботов // Тр. XXII Национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2025. – СПб.: Изд-во СПб ФИЦ РА, 2025. – Т. 2. – С. 307-319.
17. Медведев М.Ю., Костюков В.А., Пилюхов В.Х. Оптимизация движения мобильного робота на плоскости в поле конечного числа источников-репеллеров // Тр. СПИИРАН. – 2021. – Т. 19 (1). – С. 43-78.
18. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Beskhmelnov M.I. Movement of a group of unmanned aerial vehicles using an autonomous intelligent control system // Pattern Recognition and Image Analysis. Journal special issue XXI national conference on artificial intelligence with international participation. Section «Intelligent agent, robots, intelligent control, computer vision». – Pleiades Publishing, Ltd., 2025. – No. 4. – P. 543-548.
19. Байгутлина И.А. Реализация новых сервисов с использованием робототехнических комплексов // Славянский форум. – 2021. – № 4 (34). – С. 162-170.
20. 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.
21. Успанова Р.А. Актуальные проблемы управления группой БПЛА // Тр. тринадцатой общероссийской молодежной научно-технической конференции: в 2х т. Сер. Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ». – СПб., 2021. – № 76. – С. 128-130.
22. Beskhmelnov Maksim I., Vyatkin Artem A., Dobrikov Yuriy S., Lebedev Oleg B. Hybrid algorithm for route configuration formation taking into account uncertainty in terrain information // Lecture Notes in Networks and Systems: Proceedings of the IX International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry». – Springer, Czech Republic, 2025. – Vol. 2. – P. 248-265.
23. Чекалина Е.А., Дмитренко М.Е., Попов А.И. Управление роем беспилотных летательных аппаратов в тактическом звене управления // Технологии. Инновации. Связь: Сб. материалов научно-практической конференции. – СПб., 2022. – С. 181-185.

REFERENCES

1. Nogin A.A. Osnovnye elementy strukturnoy arkhitektury sensorykh uzlov [Basic elements of the structural architecture of sensor nodes], *Nauchnyy zhurnal* [Scientific Journal], 2018, No. 5 (28), pp. 37-39.
2. Markov A.V., Siman'kov V.I. Metodika rascheta traektoriy poleta bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya nablyudeniya za mestnost'yu [Methodology for calculating flight trajectories of unmanned aerial vehicles for terrain surveillance], *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki* [Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics], 2019, No. 4 (122), pp. 57-63.
3. Tsi Ch. Issledovanie planirovaniya traektorii rotornogo BPLA dlya raspyleniya pestitsidov [Study on trajectory planning of rotary UAV for pesticide spraying], *student*, 2021, Vol. 4, No. 7, pp. 654-669.
4. Rodionov A.S., Matkurbanov T.A., Khayrullaev U.B. Optimizatsiya traektorii poleta BPLA dlya monitoringa sel'skokhozyaystvennykh zemel' [Optimization of UAV flight trajectory for monitoring agricultural lands], *Problemy informatiki* [Problems of Informatics], 2025, No. 1 (66), pp. 5-17.
5. Stefas N., Plonski P.A., Isler V. Approximation algorithms for tours of orientation varying view cones, *The International Journal of Robotics Research*, 2020, Vol. 39, No. 4, pp. 389-401.
6. Rodionov A.S., Matkurbanov T.A. Planirovanie traektorii poleta BPLA pri monitoringe bol'shoy oblasti [Planning the flight trajectory of a UAV when monitoring a large area], *Informatika i avtomatizatsiya* [Computer Science and Automation], 2025, Vol. 24 (3), pp. 791-827.
7. Pshikhov V.Kh., Medvedev M.Yu., Kostyukov V.A., Khusseyin F., Kadim A. Algoritmy planirovaniya traektoriy v dvumernoy srede s prepyatstviyami [Algorithms for trajectory planning in a two-dimensional environment with obstacles], *Informatika i avtomatizatsiya* [Computer Science and Automation], 2022, Vol. 21 (3), pp. 459-492.
8. Kostyukov V.A., Medvedev M.Yu., Pshikhov V.Kh. Planirovanie dvizheniya nazemnykh robotov v srede s prepyatstviyami: algoritmy postroeniya traektoriy v gruppe pri zadannom shablone [Motion planning of ground robots in an environment with obstacles: algorithms for constructing trajectories in a group with a given template], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2023, Vol. 24, No. 1, pp. 33-45.
9. Liu B., Xiao X., Stone P. A Lifelong Learning Approach to Mobile Robot Navigation, *In IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, Vol. 6 (2), pp. 1090-1096.
10. Pradhan S., Mandava R.K., Vundavilli P.R. Development of path planning algorithm for biped robot using combined multi-point RRT and visibility graph, *International Journal of Information Technology*, 2021, Vol. 13, pp. 1513-1519.
11. Kamil A.R.M., Shithil S.M., Ismail Z.H., Mahmud M.S.A., Faudzi A.A.M. Path Planning Based on Inflated Medial Axis and Probabilistic Roadmap for Duct Environment, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, pringer, Singapore, 2022, Vol. 834.
12. Chen G., Luo N., Liu D., Zhao Z., Liang Ch. Path planning for manipulators based on an improved probabilistic roadmap method, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, Vol. 72.
13. Janos J., Vonasek V., Penicka R. Multi-Goal Path Planning Using Multiple Random Trees, *IEEE Robotics and Automation Letter*, 2021, Vol. 6 (2), pp. 4201-4208.
14. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Beskhmel'nov M.I. Modelirovanie postroeniya traektorii podvzhnogo ob'ekta na osnove metodov mnogokriterial'noy optimizatsii [Modeling the construction of the trajectory of a moving object based on multicriteria optimization methods], *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tver State Technical University. Technical Sciences], 2025, No. 3 (27), pp. 103-119.
15. Pshikhov V.Kh., Medvedev M.Yu. Sravnitel'nyy analiz tsentralizovannogo i detsentralizovannogo algoritmov dvizheniya stroem BLA mul'tikopternogo tipa [Comparative analysis of centralized and decentralized algorithms for formation movement of multicopter UAVs], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1 (225), pp. 121-139.
16. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Beskhmel'nov M.I. Avtonomnaya mul'tiagentnaya sistema upravleniya gruppoy robotov [Autonomous multi-agent control system for a group of robots], *Tr. XXII Natsional'noy konferentsii po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem KII-2025* [Proceedings of the XXII National Conference on Artificial Intelligence with International Participation KII-2025]. Saint Petersburg: Izd-vo SPb FITS RA, 2025, Vol. 2, pp. 307-319.
17. Medvedev M.Yu., Kostyukov V.A., Pshikhov V.Kh. Optimizatsiya dvizheniya mobil'nogo robota na ploskosti v pole konechnogo chisla istochnikov-repellerov [Optimization of the motion of a mobile robot on a plane in the field of a finite number of repeller sources], *Tr. SPIIRAN* [Proceedings of SPIIRAS], 2021, Vol. 19 (1), pp. 43-78.
18. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Beskhmel'nov M.I. Movement of a group of unmanned aerial vehicles using an autonomous intelligent control system, *Pattern Recognition and Image Analysis. Journal special issue XXI national conference on artificial intelligence with international participation. Section «Intelligent agent, robots, intelligent control, computer vision»*. Pleiades Publishing, Ltd., 2025, No. 4, pp. 543-548.

19. Baygutlina I.A. Realizatsiya novykh servisov s ispol'zovaniem robototekhnicheskikh kompleksov [Implementation of new services using robotic systems], *Slavyanskiy forum* [Slavic Forum], 2021, No. 4 (34), pp. 162-170.
20. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Beskhmel'nov M.I. Detsentralizovannoe upravlenie gruppoy avtonomnykh podvizhnykh ob"ektov pri formirovaniy traektorii dvizheniya [Decentralized control of a group of autonomous moving objects in the formation of a motion trajectory], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 6, pp. 177-190.
21. Uspanova R.A. Aktual'nye problemy upravleniya gruppoy BPLA [Current problems of managing a group of UAVs], *Tr. trinadtsatoy obshcherossiyskoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii: v 2kh t. Ser. Biblioteka zhurnala «Voenmekh. Vestnik BGTU»* [Proceedings of the thirteenth all-Russian youth scientific and technical conference: in 2 vol. Ser. Library of the magazine «Voenmekh. Bulletin of BSTU»]. St. Petersburg, 2021, No. 76, pp. 128-130.
22. Beskhmel'nov Maksim I., Vyatkin Artem A., Dobrikov Yuriy S., Lebedev Oleg B. Hybrid algorithm for route configuration formation taking into account uncertainty in terrain information, *Lecture Notes in Networks and Systems: Proceedings of the IX International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry»*. Springer, Czech Republic, 2025, Vol. 2, pp. 248-265.
23. Chekalina E.A., Dmitrenko M.E., Popov A.I. Upravlenie roem беспилотnykh letatel'nykh apparatov v takticheskoy zvene upravleniya [Controlling a swarm of unmanned aerial vehicles at the tactical control level], *Tekhnologii. Innovatsii. Svyaz': Sb. materialov nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Technologies. Innovation. Communication: Collection of materials of the scientific and practical conference]. St. Petersburg, 2022, pp. 181-185.

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.: 8908-5135512; кафедра информатики Института компьютерной безопасности и цифровых технологий РТУ МИРЭА; д.т.н.; профессор.

Lebedev Boris Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: lebedev.b.k@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79282897933; V.M. Kureichik Computer-Aided Design Systems Department; 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, Institute of Computer Security and Digital Technologies RTU MIREA; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 004.853

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-173-185

В.Д. Матвеев, Д.С. Кобзарь, Я.Д. Лапкин, Р.Р. Богданов, А.С. Изюмов

МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕМАНТИКИ ЕСТЕСТВЕННОГО ЯЗЫКА

Реализовать управление роботами можно большим количеством различных интерфейсов – от традиционных пультов до технологий дополненной реальности. Однако у всех подобных интерфейсов существует ряд ограничений, особенно остро возникающих в сервисной робототехнике. Они связаны с длительным обучением человека-оператора, не интуитивным для человека управлением и необходимостью полного вовлечения человека. С другой стороны, сегодня появилась новое направление, связанное с большими языковыми моделями, которые способны обрабатывать естественный язык с последующим его переводом в команды управления роботом. Существует ряд работ, демонстрирующих возможность использования языковых моделей в задачах планирования действий робота. На основе анализа существующих работ предложен новый метод управления мобильным роботом, объединяющий преимущества других методов. Метод позволяет планировать сценарии для робота, получая на вход миссию от человека на естественном языке, ТОП робота и информацию с его датчиков. В статье также описана последовательность настройки системы с использованием большой языковой модели для решения данной задачи – представлено три варианта инструкции для нейронной сети, поэтапно улучшающих достижимость формируе-

мых сценариев. После этого описаны различные миссии, которые задаются в рамках экспериментальных исследований настоящей работы – всего проверялось 100 миссий, разделенных на 4 уровня сложности в равном соотношении. Сложность миссий варьировалась от описания объектов в поле зрения робота до взаимодействия со сложно заданными миссиями, включающими синонимы объектов и неявно заданные цели. В завершении работы представлены результаты оценки алгоритма и трех вариантов инструкции. Выводом можно считать, что использование языковых моделей для задания сценариев роботам возможно, в том числе с достаточно высокой достижимостью. Модель с наиболее продвинутой инструкцией достигла 91 % правильно сформированных сценариев, что позволяет говорить о применимости разработанного метода для управления мобильным роботом на естественном языке.

Большая языковая модель; естественный язык; планирование; управление роботом; миссия робота; сценарий.

V.D. Matveev, D.S. Kobzar, Ya.D. Lapkin, R.R. Bogdanov A.S. Izyumov

A METHOD OF CONTROLLING A MOBILE ROBOT USING NATURAL LANGUAGE SEMANTICS

A large number of different interfaces can be used to control robots, from traditional remotes to augmented reality technologies. However, all such interfaces have a number of limitations, which are particularly acute in service robotics. They are associated with long-term training of a human operator, non-intuitive control for humans, and the need for full human involvement. On the other hand, a new direction has emerged today, related to large language models that are capable of processing natural language and then translating it into robot control commands. There are a number of works demonstrating the possibility of using language models in tasks of planning robot actions. Based on the analysis of existing work, a new method of controlling a mobile robot is proposed, combining the advantages of other methods. The method allows you to plan scenarios for the robot, receiving a natural language mission, the robot's TOP, and information from its sensors. The article also describes the sequence of configuring the system using a large language model to solve this problem. Three variants of instructions for the neural network are presented, which gradually improve the achievability of the generated scenarios. After that, various missions are described, which are set as part of experimental studies - a total of 100 missions were tested, divided into 4 levels of difficulty in equal proportions. The complexity of the missions ranged from describing objects in the robot's field of view to interacting with complex missions involving synonyms of objects and implicitly defined goals. At the end of the work, the results of the evaluation of the algorithm and three variants of the instruction are presented. The conclusion can be considered that the use of language models to assign scenarios to robots is possible, including with a sufficiently high achievement. The model with the most advanced instruction reached 91% of correctly formed scenarios, which suggests the applicability of the developed method for controlling a mobile robot in natural language.

Large language model; natural language; planning; robot control; robot mission; scenario.

Введение. Одной из важных проблем робототехники является разработка интуитивных и простых для обучения человека интерфейсов управления различных комплексами. Практически все современные интерфейсы обладают своими особенностями, которые не позволяют целиком переносить опыт управления одного комплекса на другой. И даже если управление осуществляется при помощи одинаковых интерфейсов – например, при помощи пульта или технологий дополненной реальности [1] – это сохраняет проблему привыкания к новому виду устройства управления. Кроме того, все эти интерфейсы требуют значительное время для обучения новых операторов.

При этом появление в последнее время больших языковых моделей [2], обладающих возможностью обрабатывать естественный язык, и вместе с тем взаимодействовать с различными техническими системами, может помочь решить данную проблему. Это стало возможным благодаря трансформерной архитектуре [3], которая может хорошо справляться с достаточно большими последовательностями текста, и которая позже легла в основу языковых моделей.

Построением же агентных систем [4] на основе больших языковых моделей занимается множество различных научных коллективов по всему миру. Однако применение такого подхода к управлению роботами весьма ограничено. Некоторые из наиболее ин-

интересных публикаций будут показаны ниже. При этом существующие положительные примеры применения больших языковых моделей для принятия решений или моделирования рассуждений [5, 6] показывают, что такие модели потенциально могут справляться не только с управлением системы из одного робототехнического агента, но и с группами.

Однако, в рамках данной работы внимание сконцентрировано на разработке алгоритма управления мобильным наземным роботом, сценарии для которого формирует языковая модель. Сначала в работе описан сам алгоритм, последовательность действий, которая происходит при управлении таким роботом. Затем описано, как настраивалась система с использованием большой языковой модели (БЯМ), через какие этапы улучшения проходили инструкции для нее, прежде чем был достигнут достаточно высокий результат выполнения задач от человека. Далее следует описание того, какие миссии ставились роботу – такие миссии были разделены на четыре вида, разделенные по своей сложности. Завершают работу результаты экспериментальных исследований, в которых показано, что последовательное улучшение инструкций принесло значительные улучшения в системе, позволив добиться от языковой модели верных сценариев в 91% случаев.

Практика управления роботами с использованием языковых моделей. Внедрение БЯМ для управления роботизированными системами в последнее время является широко исследуемой темой благодаря тому, что большие языковые модели способны оперировать огромным объемом знаний, а также понимать контекст и связи между различными концепциями. Другим важным преимуществом языковых моделей является умение вести диалог на естественном языке, что позволяет значительно снизить порог требуемых от оператора робота компетенций для взаимодействия с системой [8]. В качестве основных задач, для решения которых в настоящий момент применяются, БЯМ можно выделить следующие: рассуждение [9], планирование действий [10], навигация [11] и манипуляция [12]. В настоящей работе основной упор делается на планирование действий и рассуждение БЯМ, в связи с чем далее будет рассмотрено несколько работ на эту тематику.

Важным аспектом использования БЯМ в качестве интеллектуального агента для планирования действий является понимание моделью окружения, извлечение информации о пространстве и предметной области. Иначе ее сценарии будут слишком противоречивы и абстрактны. Для решения этой проблемы, авторами работы SayCan [10] был предложен следующий подход: вместо того, чтобы напрямую генерировать сценарий работы, языковая модель оценивает какое из доступных на данный момент действий робота сможет внести больший вклад для достижения поставленной цели. Кроме этого, учитываются значения «функции возможностей», которая оценивает вероятность успешного выполнения команды. Сами эти функции формируются в процессе обучения с подкреплением.

Развитием данного подхода является работа SayCanPay [13]. Аналогично оригинальной работе, часть системы «Say» выбирает наиболее вероятные действия на каждом шаге, «Can» – проверяет осуществимость действий, а новый элемент «Pay» – оценивает выигрыш от выполнения каждого действия в контексте решения задачи. То есть, учитывается не только вероятность выбора действия и его осуществимость, но и то, насколько это действие приблизит робота к выполнению цели.

Кроме составления последовательного сценария из заранее доступных низкоуровневых действий, ТОП, языковые модели также могут составлять высокоуровневые планы действий, на основе общего описания доступных роботу действий, как, например, в работе LLM-Planner [14]. Такие планы затем идут на следующий уровень, который превращает их в действия робота, а сам подход позволяет добиться большей гибкости и эффективности, поскольку для планирования больше не требуется предварительное знание о всей предметной области функционирования робота, а количество обращений к модели уменьшается. В запрос модели попадают только те объекты, которые находятся в области видимости сенсоров робота в настоящий момент. Это позволяет достаточно хорошо адаптировать действия к окружающей действительности. Кроме того, для повышения эффективности планирования авторы также предлагают добавлять в инструкцию к моде-

ли примеры выполнения некоторых задач. Нет необходимости добавлять в нее все множество возможных решений – для успешной демонстрации достаточно пары наиболее подходящих к текущей задаче. Далее составляемые последовательности действий сравниваются с примерами при помощи модели на основе BERT [15], в результате чего выбирается наиболее подходящий из них.

В работе PaLM-E [16] авторы предлагают идею преобразования всех данных от робота – изображений, показания сенсоров – в векторное пространство языковой модели. В основе такого решения лежит предварительно обученная языковая модель PaLM [17]. Результатом работы данной системы являются верхне-уровневые решения, которые опираются на данные сенсоров, поскольку их использование из векторного пространства для модели является наиболее удобным способом взаимодействия с окружающей средой.

Еще одним важным подходом к планированию действий является метод ReAct [9]. Он рассматривает тесную интеграцию действия и размышления об эффективности действия – как способ значительно повысить качество составляемых сценариев. Это позволяет осуществлять действия во время размышления и получать дополнительную информацию об окружающей среде за счет информации о результате – то есть о действии и его оценке для достижения цели, что в свою очередь повышает точность планирования действий. При этом робот не затрачивает время на простои, поскольку размышление может проводиться прямо во время выполнения операций. В результате система не только позволяет эффективно обрабатывать различные нештатные ситуации в реальном времени, но и самостоятельно извлекать недостающую информацию для формирования решения.

Таким образом, существует множество подходов к реализации планирования действий с использованием больших языковых моделей. В следующем разделе будет представлен алгоритм, который составляет сценарии из низкоуровневых ТОП робота, при этом оценивая на каждом шаге, насколько конкретный ТОП подходит для достижения цели.

Постановка задачи. Использование больших языковых моделей дает возможность описывать миссию робота на естественном языке, силами оператора, который не имеет опыта работы с данным роботом и не знаком с интерфейсами его системы управления. При этом возникает проблема отработки сформированной миссии со стороны системы управления роботом. Для решения указанной проблемы авторами сформулирована задача разработки комплексного метода управления, интегрирующего обработку следующих компонентов:

- ◆ описание миссии на естественном языке;
- ◆ описание функциональных возможностей робота в виде перечня технологических операций (ТОП);
- ◆ описание окружающей обстановки.

Под «миссией на естественном языке» в данном случае подразумевается потенциально выполнимая для конкретного робота задача, сформулированная с использованием языковых конструкций русского языка. Миссия является входной информацией для алгоритма формирования сценариев.

Сценарий робота является выходом алгоритма планирования выполнения миссии и передается в машинно-интерпретируемом формате на робота для отработки в виде последовательности технологических операций (ТОП). Под «ТОП робота» [7] подразумевается типовая операция, элементарное действие, выполняемое роботом.

Описание окружающей обстановки формируется сенсорной системой робота. Описание окружающего пространства относится к входным данным алгоритма планирования выполнения миссии. В отличие от статичного набора ТОП это описание формируется и изменяется в процессе исполнения сценария.

Для обеспечения безопасности необходима процедура оценки или проверки формируемых сценариев, поскольку существующие языковые модели допускают неоднозначность и ошибочность выводов. Процедура проверки позволит на раннем этапе отсеять принципиально неверные сценарии работы.

На базе такого комплексного метода может быть сформирован алгоритм управления роботом силами оператора, формулирующего миссию на естественном языке.

Алгоритм управления роботом с использованием большой языковой модели. Алгоритм управления роботом представлен на рис. 1. На данном рисунке желтыми прямоугольными фигурами обозначены информационные сообщения, которые передаются между различными частями системы. Зеленые блоки означают шаги, ответственные за планирование и исполнение действий на роботе, а синие – части информационного пространства системы.

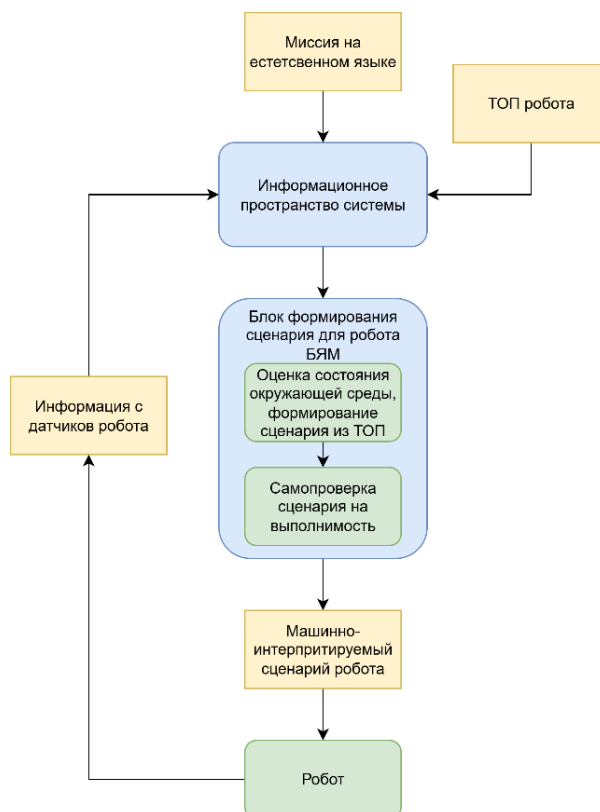


Рис. 1. Метод управления роботом с использованием БЯМ

Таким образом, пользователь задает некоторый запрос на естественном языке – миссию для робота. Эта миссия попадает на вход большой языковой модели вместе с информацией о том, какие ТОП есть у робота, что он может делать и как функционировать. Кроме того, в языковую модель поступают данные об объектах вокруг робота, которые он смог обнаружить при помощи своих датчиков.

Далее, на основе этой информации происходит разработка сценария для робота при помощи большой языковой модели. Формирование сценария носит двухэтапный характер – на первом этапе языковая модель обрабатывает информацию с датчиков и проводит поиск объектов, с которыми пользователь попросил взаимодействовать. Также, в этот момент строится предварительный сценарий из ТОП робота – в формате естественного языка с указанием того, какие действия необходимо выполнить для достижения целей миссии.

На втором этапе происходит проверка достижимости построенного сценария. Языковая модель переключается в режим оценки и начинает сравнивать возможности робота и его ТОП с построенным сценарием – нет ли противоречий в последовательности действий, в их характере, а также числовых характеристиках данных действий (например, в дистанции прямолинейного движения). Если все проверки проходят успешно, сформированный ранее сценарий превращается в свою машинно-интерпретируемую версию и отправляется роботу для исполнения.

После полного исполнения конкретного сценария алгоритм повторяется снова – происходит сбор данных об изменившейся окружающей среде, получается новая миссия от человека-оператора и производится планирование с проверкой возможности исполнения сценария. Таким образом, предлагаемый алгоритм осуществляет средне-уровневое планирование действий при помощи заданных ТОП роботов с осуществлением проверки разработанного сценария.

Настройка системы с использованием большой языковой модели для анализа естественного языка. Для проведения экспериментальных исследований по построению управления роботом при помощи больших языковых моделей необходимо, в первую очередь, выбрать используемую БЯМ. Оценка качества различных БЯМ и выбор наиболее подходящей для задач робототехники была проведена в одной из предыдущих работ [18]. Наилучший результат показала модель Gemma-3-27b-it [19], выбранная по результатам сравнения на основе BertScore [20] метрики, а также скорости ответа.

Вторым важным аспектом настройки системы с использованием БЯМ является правильное составление инструкции (промта) к модели. Данная инструкция должна кратко описывать все части предметной области, которые модель затрагивает при построении своего ответа – в данном случае, сценария для роботов. Всего было подготовлено три инструкции, которые содержали различные изменения и улучшения по отношению к предыдущим.

Первая инструкция содержала, в основном, описание различных составляющих системы. Например, в ней описывалось устройство робота и описание его системы координат – «У робота 4 движителя. Моторы есть на каждом из них...». Далее в инструкции содержалось описание задачи, которую получает БЯМ и которую необходимо превратить в действие робота: «...Тебе будут поступать команды с задачами перемещения к какому-либо объекту в комнате – объекты будут названы своими названиями на естественном языке. Также в качестве входных данных будет поступать JSON с координатами этих объектов в системе координат робота, а также дистанцией и углом до него. Проводи свои размышления на основе этих данных. Тебе необходимо подумать над тем, как достичь указанной точки, используя атомарные ТОП из своего перечня...».

Затем в инструкции описан ожидаемый результат в формате JSON, задающий выходные поля, которые БЯМ должна заполнить при составлении сценария. В качестве параметров были выбраны – тип движения, направление, скорость, дистанция и угол. Пример такого JSON, отражающего ТОП робота, представлен в таблице табл. 1.

Таблица 1

Пример выводимого ТОП языковой моделью

Параметр	«type»	«direction»	«speed»	«distance»	«angle»
Принимаемые значения	«linear» «angular»	«forward», «backward» «left», «right»	int 0...1	int	int 0...180
Характер параметра	Задаёт тип движения	Задаёт направление движения	Задаёт скорость движения в доле от возможностей двигателей	Задаёт расстояние прямолинейного движения	Задаёт угол поворота углового движения

Следующая часть инструкции посвящена описанию среды и правил формирования команд: «...Формируй команды, состоящие из одного ТОП (ТОР) всегда ... Если цель не находится в пределах достижения одной команды, построй последовательность атомарных команд».

И в качестве завершающей части инструкции приводятся рекомендации по процессу формирования решения: «Думай по шагам ... В первую очередь сформируй последовательность шагов решения на естественном языке, затем явно выступи json для ТОП... Если пользователь даёт замечания или комментарии – нужно исправить их...».

После подготовки и практической апробации данной инструкции было замечено, что БЯМ плохо справляется с математическими расчетами. Это происходит из-за того, что при составлении формальных математических операций модель зачастую слишком вольно подставляет значения в расчеты. В связи с этим, вторая версия инструкции была дополнена в данной части.

Кроме того, в ней был описан явный алгоритм, который должен применяться при выполнении сложных поэтапных сценариев. Данный алгоритм достаточно обширный и не приведен в настоящей работе. Также было добавлено несколько практических примеров – описание окружающих объектов и их координат, а затем ожидаемый вывод модели. В результате улучшенная инструкция позволила добиться значительных успехов, например, при объезде препятствий – как одном из видов длительных поэтапных сценариев.

В третьей версии инструкция была значительно пересмотрена. Во-первых, было замечено, что предыдущие версии инструкции слишком обширные и обобщенные – это приводит к ошибкам в выводе сценариев модели. Соответственно, проведено их сокращение и уточнение с примерами для сложных задач и функционала поэтапных сценариев.

Одним из нововведений в данной версии инструкции стало добавление нового уровня рассуждения модели, чтобы она могла работать с синонимами слов. Это помогло повысить точность и корректность движения к сложно-заданным целям, поскольку ранее при столкновении с такими задачами модель генерировала ошибочные сценарии.

Кроме проверки сценариев на корректность, в инструкции были внесены требования к проверке параметров ТОП. Также дополнительные проверки коснулись и строения робота – теперь его описание было задано более явно, а любые формируемые сценарии должны перепроверяться в соответствии с возможностями текущего робота – а не просто опираться на них.

Изменилась постановка команды на следующую: *«Твоя основная задача - перемещение в пространстве по заданным командам, а дополнительная – исследование окружающей среды»*. Данное изменение сделано в связи с тем, что некоторые задачи оказались чересчур сложны для прошлой постановки – и необходимо было расширить область рассуждений модели за счет введения исследовательской части работы робота. Введение такого понятия, как исследование пространства позволило приблизиться к более высокому уровню понимания и качества планирования действий большой языковой моделью.

Третий вариант инструкции, описанный выше, показал наиболее высокий результат при тестировании на одних и тех же задачах и запросах. Варианты заданий рассмотрены в следующем разделе.

Описание используемых в экспериментах миссий мобильного робота. Основной целью экспериментов, проводимых в рамках данной работы, является исследование влияния различных формулировок одного и того же сценария, и содержания инструкции (промпта) к БЯМ, на качество и эффективность планирования действий мобильного робота.

Всего было подготовлено два вида групп контрольных испытаний, с помощью которых проходило тестирование способностей БЯМ: ответы на вопросы об окружении и команды перемещения для робота, условно разделенные на 3 уровня сложности. Группа испытаний, связанная с ответами на вопросы, в первую очередь позволяет проверить понимание положения и пространственных зависимостей языковой моделью. Примеры таких испытаний следующие: «Что ты видишь?», «Что находится ближе всего к тебе?», «Перечисли предметы слева от тебя».

Вторая группа испытаний представляет собой команды перемещения для робота. Как было сказано выше, данные команды разделены на 3 уровня по сложности. К первому уровню относятся наиболее простые задачи из одного действия, например: «Поверни на угол 30 градусов» или «Двигайся 1 метр назад». Основная цель проведения испытаний перемещения первого уровня сложности заключается в исследовании умения языковой модели оперировать ТОП робота, представленного форматом JSON, для управления мобильным роботом.

В качестве второго уровня сложности использованы команды, которые требуют от БЯМ навыков планирования последовательности действий. Эти навыки включают в себя как планирование движения к определенному объекту (в том числе способность самостоятельно определить угол поворота и расстояние до объекта по приходящему массиву углов и расстояний всех объектов в поле зрения), так и умение изменять сценарий – де-

композируя более сложную задачу на несколько простых ТОП и наоборот, собирая из нескольких ТОП последовательный сценарий. Кроме того, оценивалась и безопасность планируемого движения. Наиболее сложные задачи из данной группы требовали многошагового планирования перемещения – например, осуществление объезда какого-либо объекта. В таком случае модели необходимо было самостоятельно построить такую последовательность действий, в которой робот сначала приближается к объекту, а потом оценив необходимое расстояние – производит его объезд.

К третьему уровню сложности относились команды, требующие от модели не только умений планирования последовательности действий, но и демонстрации понимания естественного языка на достаточно глубоком уровне – то есть понимания передаваемой задачи по неявному описанию, например: использование синонимов, описаний предмета – «двигайся к небольшому предмету в форме шара» или даже по целевому описанию – «переместись туда, куда можно поставить тарелку». Также проверялось умение осознавать цель, постановка которой проводится в неявном виде – например, задание команды «Я хочу пить» – и соответствующее передвижение робота к кружке или бутылке с водой в его поле зрения.

Результат экспериментальных исследований. В процессе проведения оценки качества подготовленных ранее инструкций для больших языковых моделей было решено остановиться на 100 экспериментах для каждой версии инструкции. При этом, в это число в равном соотношении попали все рассмотренные выше тестовые сценарии, а именно: ответы на вопросы и задания первого, второго и третьего уровня сложности. При этом общее число тестов было выбрано таким образом, чтобы это позволило наиболее точно отразить эффективность каждой инструкции. В частности, в процессе экспериментов неоднократно наблюдалась ситуация, когда на один и тот же запрос, к примеру: «переместись к полке», модель выдавала принципиально разные рассуждения. Так, в один раз планирование было успешно, а в другой модель могла перепутать направление поворота или вообще забыть про полку и отправить команду двигаться в другом направлении.

В табл. 2 представлены примеры задач ответа на вопрос и первого уровня сложности. Второй и третий уровни не представлены в связи с тем, что их рассуждения слишком большие.

Таким образом, каждый из экспериментов проходил следующим образом: большая языковая модель получала команду и после некоторых рассуждений формировала JSON-команду для робота (рис. 2).

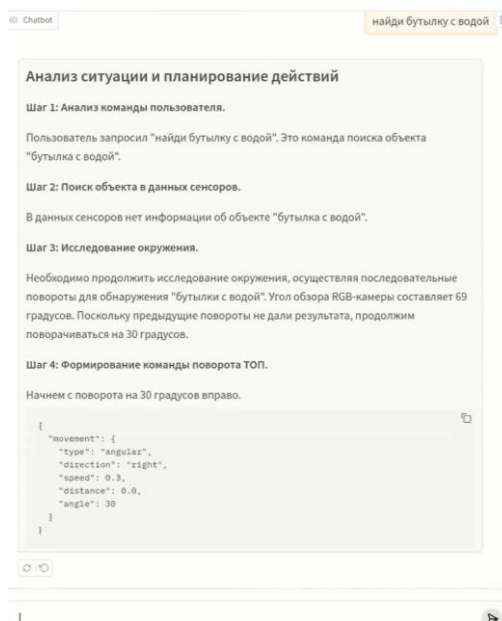


Рис. 2. Пример работы алгоритма

Информацию об изменении положения и перемещения к цели БЯМ получала при помощи камеры и изменения ей расстояния до окружающих объектов. На рис. 3 представлен вид с камеры робота, который отображается в RviZ [21].

Таблица 2

Пример работы алгоритма при различном уровне задач

Категория команды	Запрос	Рассуждения	Ответ
Ответы на вопросы	Что ты видишь?	Анализ ситуации и планирование действий Шаг 1: Анализ команды пользователя. Пользователь задал вопрос "Что ты видишь?". Это запрос на описание окружения на основе данных с датчиков. Шаг 2: Формирование текстового ответа. "В поле зрения находятся: мусорный контейнер на расстоянии 1.0 метра под углом 4.4 градуса, шкафы на расстоянии 2.52 метра под углом -22.93 градуса и мебель на расстоянии 2.52 метра под углом -22.93 градуса." Шаг 3: Формирование команды ТОП (отсутствует, так как это вопрос).	Ответ: В поле зрения находятся: мусорный контейнер на расстоянии 1.0 метра под углом 4.4 градуса, шкафы на расстоянии 2.52 метра под углом -22.93 градуса и мебель на расстоянии 2.52 метра под углом -22.93 градуса.
1 уровень сложности	Поворот на -30 градусов	Анализ ситуации и планирование действий Шаг 1: Анализ команды пользователя. Пользователь запросил "поворот на -30 градусов". Это команда поворота. Отрицательный угол означает поворот влево. Шаг 2: Проверка допустимости операции. Операция поворота соответствует доступным ТОПам. Угол -30 градусов находится в допустимом диапазоне (≥ 0 и ≤ 180). Так как угол отрицательный, направление поворота должно быть "left". Шаг 3: Формирование команды Топ. Создаем JSON команду для поворота на 30 градусов влево.	<pre>{ "movement": { "type": "angular", "direction": "left", "speed": 0.3, "distance": 0.0, "angle": 30 } }</pre>

В результате были получены следующие результаты, которые для наглядности были сгруппированы по допущенным моделью ошибкам в табл. 3. Следует пояснить смысл данных ошибок:

◆ игнорирование команды – это ситуация, в которой модель игнорирует заданную команду и выполняет что-либо другое;

- ♦ некорректная сторона поворота – ситуация, в которой БЯМ путает право и лево, ошибкой считается, когда это приводит к невыполнению задания;
- ♦ иррациональные рассуждения – ситуация, когда модель выдает кардинально неверные команды для выполнения задачи;
- ♦ некорректный порядок действия – ситуация, в которой модель путает последовательность действий, в результате чего не удастся достигнуть цели;
- ♦ удаление команды из памяти – ситуация, когда модель планирует выполнение миссии в несколько шагов, но на шагах дальше первого забывает прошлые действия и начинает вести себя непредсказуемо;
- ♦ безопасность – робот имеет реализованную систему безопасности, которая отвечает за экстренную остановку перед объектами, находящимися слишком близко к нему – столкновения с такими объектами вызывали данную ошибку (но не полную неудачу выполнения миссии).



Рис. 3. Экспериментальные исследования метода на мобильном роботе

При этом, в целом иногда в одном и том же действии модель могла сформировать решение, допускающее несколько ошибок одновременно, поэтому суммарное количество ошибок может превышать общее число тестов.

Таблица 3

Количество ошибок и процент успешного выполнения команд пользователя

Ошибки	Инструкция 1	Инструкция 2	Инструкция 3
Игнорирование команды	6	2	0
Некорректная сторона поворота	12	8	6
Иррациональные рассуждения	9	8	3
Некорректный порядок действий	3	0	1
Удаление команды из памяти	6	0	1
Безопасность	31	13	0
Доля правильно сформированных сценариев	64%	78%	91%

В качестве результирующей метрики была рассчитана доля правильно сформированных сценариев, значения которой также приведены в табл. 3. Анализируя количество ошибок по каждой категории, а также итоговый процент выполнения задач можно на-

глядно увидеть, что внесенные на втором и третьем шаге написания инструкции улучшения позволили существенно повысить качество планирования действий робота при помощи большой языковой модели.

Заключение. В настоящей работе предложен метод управления роботом при помощи естественных языковых команд оператора. Роль языковой модели в данном алгоритме состоит в планировании действий для робота, обработки миссии, поступающей от человека на естественном языке и составлении машинно-интерпретируемого сценария, в рамках которого должен работать робот. Кроме того, в работе рассказан процесс настройки БЯМ для выполнения данной задачи, а также приведено описание различных миссий, которые проверялись в рамках экспериментальных исследований.

По результатам самих экспериментов можно сделать вывод о достаточно высокой применимости больших языковых моделей для планирования действий. Наиболее поздняя настройка языковой модели продемонстрировала 91% верно предлагаемых сценариев, допустив при этом наибольшее (6) число ошибок в математических расчетах модели.

Также, важным наблюдением по результатам работы стало то, что даже незначительных изменения и уточнения, внесенных в инструкцию к модели, несут большое значение, поскольку позволяют повысить качество рассуждений модели в процессе планирования действий, а в результате – сократить количество допускаемых ошибок и увеличить процент успешного выполнения поставленной задачи.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-00558-26-00 от 12.01.2026 «Исследование методов самоорганизации и семантического взаимодействия в гибридных группах робототехнических агентов повышенной автономности» (FNRG-2025-0006).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сергеев А.В., Гук М.Ю.* Управление мобильным роботом космического назначения с применением виртуальной реальности и силомоментного оцувствления // Пилотируемые полеты в космос. – 2018. – № 4. – С. 44.
2. *Zhao W.X. et al.* A survey of large language models // arXiv preprint arXiv:2303.18223. – 2023. – Vol. 1, No. 2.
3. *Vaswani A. et al.* Attention is all you need // Advances in neural information processing systems. – 2017. – Vol. 30.
4. *Wang L. et al.* A survey on large language model based autonomous agents // Frontiers of Computer Science. – 2024. – Vol. 18, No. 6. – P. 186345.
5. *Chen Qian, Wei Liu, et al.* Chatdev: Communicative agents for software development // In Proc. of ACL. – 2024.
6. *Nian Li, Chen Gao, Mingyu Li, Yong Li, and Qingmin Liao.* Econagent: large language model-empowered agents for simulating macroeconomic activities // In Proc. of ACL. – 2024.
7. *Смирнова Е.Ю., Спасский Б.А.* Организация супервизорного управления в сценариях экстремальной робототехники // Робототехника и техническая кибернетика. – 2020. – Т. 8, № 4. – С. 245-258.
8. *Ma Y. et al.* A survey on vision-language-action models for embodied ai // arXiv preprint arXiv:2405.14093. – 2024.
9. *Yao S. et al.* React: Synergizing reasoning and acting in language models // The eleventh international conference on learning representations. – 2022.
10. *Ahn M. et al.* Do as i can, not as i say: Grounding language in robotic affordances // arXiv preprint arXiv:2204.01691. – 2022.
11. *Anwar A. et al.* Remembr: Building and reasoning over long-horizon spatio-temporal memory for robot navigation // 2025 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2025. – P. 2838-2845.
12. *Huang S. et al.* Instruct2act: Mapping multi-modality instructions to robotic actions with large language model // arXiv preprint arXiv:2305.11176. – 2023.
13. *Hazra R., Dos Martires P. Z., De Raedt L.* Saycanpay: Heuristic planning with large language models using learnable domain knowledge // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2024. – Vol. 38, No. 18. – P. 20123-20133.

14. Song C.H. et al. Llm-planner: Few-shot grounded planning for embodied agents with large language models // *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*. – 2023. – P. 2998-3009.
15. Devlin J. et al. Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding // *Proceedings of the 2019 conference of the North American chapter of the association for computational linguistics: human language technologies*, volume 1 (long and short papers). – 2019. – P. 4171-4186.
16. Driess D, et al. Palm-e: An embodied multimodal language model. – 2023.
17. Chowdhery A, et al. Palm: Scaling language modeling with pathways // *Journal of Machine Learning Research*. – 2023. – Vol. 24, No. 240. – P. 1-113.
18. Лапкин Я.Д., Матвеев В.Д. Сравнительный анализ больших языковых моделей для автономных робототехнических систем // *Экстремальная робототехника*. – 2025. – № 1 (36). – С. 110-115. – EDN FXTPGG.
19. Gemma Team: Aishwarya Kamath, et al. Google DeepMind. Gemma 3 Technical Report // *arXiv:2503.19786*. – 2025.
20. Tianyi Zhang, et al. BERTScore: Evaluating Text Generation with BERT // *arXiv:1904.09675*. – 2019.
21. Rviz User's Guide // *RViz 1.9.0 documentation*. – URL: https://docs.ros.org/en/jade/api/rviz/html/user_guide/ (дата обращения 10.02.2026).

REFERENCES

1. Sergeev A.V., Guk M.Yu. Upravlenie mobil'nym robotom kosmicheskogo naznacheniya s primeneniem virtual'noy real'nosti i silomomentnogo ochuvstvleniya [Control of a mobile space robot using virtual reality and force-moment sensing], *Pilotiruemye polety v kosmos* [Manned Space Flights], 2018, No. 4, pp. 44.
2. Zhao W.X. et al. A survey of large language models, *arXiv preprint arXiv:2303.18223*, 2023, Vol. 1, No. 2.
3. Vaswani A. et al. Attention is all you need, *Advances in neural information processing systems*, 2017, Vol. 30.
4. Wang L. et al. A survey on large language model based autonomous agents, *Frontiers of Computer Science*, 2024, Vol. 18, No. 6, pp. 186345.
5. Chen Qian, Wei Liu, et al. Chatdev: Communicative agents for software development, *In Proc. of ACL*, 2024.
6. Nian Li, Chen Gao, Mingyu Li, Yong Li, and Qingmin Liao. Econagent: large language model-empowered agents for simulating macroeconomic activities, *In Proc. of ACL*, 2024.
7. Smirnova E.Yu., Spasskiy B.A. Organizatsiya supervizornogo upravleniya v stsenariyakh ekstremal'noy robototekhniki [Organization of supervisory control in scenarios of extreme robotics], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2020, Vol. 8, No. 4, pp. 245-258.
8. Ma Y. et al. A survey on vision-language-action models for embodied ai, *arXiv preprint arXiv:2405.14093*, 2024.
9. Yao S. et al. React: Synergizing reasoning and acting in language models, *The eleventh international conference on learning representations*, 2022.
10. Ahn M. et al. Do as i can, not as i say: Grounding language in robotic affordances, *arXiv preprint arXiv:2204.01691*, 2022.
11. Anwar A. et al. Remembr: Building and reasoning over long-horizon spatio-temporal memory for robot navigation, *2025 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2025, pp. 2838-2845.
12. Huang S. et al. Instruct2act: Mapping multi-modality instructions to robotic actions with large language model, *arXiv preprint arXiv:2305.11176*. – 2023.
13. Hazra R., Dos Martires P. Z., De Raedt L. Saycanpay: Heuristic planning with large language models using learnable domain knowledge, *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2024, Vol. 38, No. 18, pp. 20123-20133.
14. Song C.H. et al. Llm-planner: Few-shot grounded planning for embodied agents with large language models, *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*, 2023, pp. 2998-3009.
15. Devlin J. et al. Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding, *Proceedings of the 2019 conference of the North American chapter of the association for computational linguistics: human language technologies*. Vol. 1 (long and short papers), 2019, pp. 4171-4186.
16. Driess D, et al. Palm-e: An embodied multimodal language model, 2023.

17. Chowdhery A, et al. Palm: Scaling language modeling with pathways, *Journal of Machine Learning Research*, 2023, Vol. 24, No. 240, pp. 1-113.
18. Lapkin YA.D., Matveev V.D. Sravnitel'nyy analiz bol'shikh yazykovykh modeley dlya avtonomnykh robototekhnicheskikh sistem [Comparative analysis of large language models for autonomous robotic systems], *Ekstremal'naya robototekhnika* [Experimental Robotics], 2025, No. 1 (36), pp. 110-115. EDN FXTPGG.
19. Gemma Team: Aishwarya Kamath, et al. Google DeepMind. Gemma 3 Technical Report, *arXiv:2503.19786*, 2025.
20. Tianyi Zhang, et al. BERTScore: Evaluating Text Generation with BERT, *arXiv:1904.09675*, 2019.
21. Rviz User's Guide, *RViz 1.9.0 documentation*. Available at: https://docs.ros.org/en/jade/api/rviz/html/user_guide/ (accessed 10 February 2026).

Кобзарь Дарья Сергеевна – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: d.kobzar@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125520110; математик.

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.: +78125520110; м.н.с.

Лапкин Ярослав Дмитриевич – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: ya.lapkin@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125520110; техник.

Богданов Ростислав Романович – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: r.bogdanov@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125520110; техник.

Изыумов Антон Сергеевич – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: a.izyumov@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125520110; техник.

Kobzar Darya Sergeevna – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: d.kobzar@rtc.ru; St Petersburg, Russia; phone: +78125520110; mathematician.

Matveev Viktor Dmitrievich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: v.matveev@rtc.ru; St Petersburg, Russia; phone: +78125520110; junior research fellow.

Lapkin Yaroslav Dmitrievich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: ya.lapkin@rtc.ru; St Petersburg, Russia; phone: +78125520110; technician.

Bogdanov Rostislav Romanovich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: r.bogdanov@rtc.ru; St Petersburg, Russia; phone: +78125520110; technician.

Izyumov Anton Sergeevich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: a.izyumov@rtc.ru; St Petersburg, Russia; phone: +78125520110; technician.

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-185-201

М.Ю. Медведев, В.Х. Пшихопов, А.Р. Гайдук, И.М. Медведев, Е.Ю. Косенко

МЕТОДЫ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В ЗАДАЧАХ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Актуальность проблемы адаптивного управления нелинейными динамическими объектами обеспечивается постоянно возрастающими требованиями к качеству и условиям функционирования технических систем. Автоматизация и роботизация приводят к возрастанию сложности решаемых задач и необходимости адаптироваться к структурной и параметрической неопределенности, внешним возмущениям. В последние несколько лет приобретает популярность применение методов обучения с подкреплением для синтеза адаптивных систем управления. Указанные методы демонстрируют эффективность при управлении неопределенными динамическими объектами. Однако, существует две базовые проблемы применения методов машинного обучения в

системах управления динамическими объектами. Во-первых, необходимость обеспечения асимптотической устойчивости желаемой траектории замкнутой системы ограничивает применение методов глубокого обучения. Во-вторых, в процессе обучения необходимо, чтобы интеллектуальный регулятор не вырабатывал управления, приводящие к выходу переменных состояния за заданные ограничения. Целью данной статьи является обзор и анализ последних достижений в области применения методов обучения с подкреплением для синтеза адаптивных систем управления нелинейными динамическими объектами. Отдельное внимание уделяется методам Actor-Critic, которые по своей структуре близки к адаптивным системам управления с самонастраивающимися параметрами. На основе проведенного анализа предлагается структура адаптивной системы с двухкомпонентным управлением, включающим номинальный и адаптивный регуляторы. Предлагается алгоритм адаптивного управления, отличающийся использованием модифицированного алгоритма Actor-Critic, новой формой дельта-ошибки и отсутствием особенности в окрестности нуля. Предлагаемый алгоритм позволяет снизить число настраиваемых параметров. В статье приводятся условия устойчивости по Ляпунову нулевого положения равновесия замкнутой системы и пример синтеза и моделирования предлагаемого алгоритма адаптивного управления.

Обучение с подкреплением; адаптивное управление; нелинейный объект; алгоритм Actor-Critic; устойчивость.

M.Yu. Medvedev, V.Kh. Pshikhov, A.R. Gaiduk, I.M. Medvedev, E.Yu. Kosenko

REINFORCEMENT LEARNING METHODS IN ADAPTIVE CONTROL OF NONLINEAR DYNAMIC OBJECTS

The relevance of the problem of adaptive control of nonlinear dynamic objects is ensured by the ever-increasing demands on the quality and operating conditions of technical systems. Automation and robotics lead to an increase in the complexity of the problems being solved and the need to adapt to structural and parametric uncertainty and external disturbances. In recent years, the use of reinforcement learning methods for the synthesis of adaptive control systems has gained popularity. These methods demonstrate effectiveness in controlling uncertain dynamic objects. However, there are two fundamental problems with the application of machine learning methods to control systems for dynamic objects. First, the need to ensure asymptotic stability of the desired trajectory of a closed-loop system limits the application of deep learning methods. Second, during the learning process, it is necessary that the intelligent controller does not generate controls that lead to state variables exceeding specified limits. The purpose of this article is to review and analyze recent advances in the application of reinforcement learning methods to the synthesis of adaptive control systems for nonlinear dynamic objects. Particular attention is given to Actor-Critic methods, which are structurally similar to adaptive control systems with self-adjusting parameters. Based on the analysis, the structure of an adaptive system with two-component control, including nominal and adaptive controllers, is proposed. An adaptive control algorithm is proposed, distinguished by the use of a modified Actor-Critic algorithm, distinguished by a new form of the delta error and the absence of a singularity in the neighborhood of zero. The proposed algorithm allows for a reduction in the number of adjustable parameters. The article presents conditions for Lyapunov stability of the zero-equilibrium position of a closed-loop system and an example of the synthesis and modeling of the proposed adaptive control algorithm.

Reinforcement learning; adaptive control; nonlinear object; Actor-Critic algorithm; robustness.

Введение. Проблема адаптивного управления всегда являлась одной из центральных в теории автоматического управления. Одним из общих подходов к решению данной проблемы является метод адаптивного управления с самонастраивающимися параметрами [1, 2]. В рамках данного метода показано, что для линейных объектов обеспечивается асимптотическая устойчивость нулевого положения замкнутой системы. Для нелинейных систем линейная структура регулятора, в общем случае, может обеспечить асимптотическую устойчивость заданного положения в локальной области. В нелинейном случае наиболее часто обеспечивается устойчивость по Ляпунову, которая гарантирует нахождение ошибки в некоторой ограниченной области.

Для нелинейных систем основная проблема состоит в выборе структуры регулятора в условиях неопределенности модели объекта. Появление искусственных нейронных сетей, которые эффективно решают задачи многомерной аппроксимации, дало очередной импульс развитию адаптивных систем с настраиваемыми параметрами. Одним из рас-

пространственных способов применения нейронных сетей – параметрическая настройка параметров базового регулятора или аппроксимация модели объекта [3–5]. В таких системах алгоритм управления и адаптации / идентификации синтезируются отдельными контурами, что упрощает настройку и анализ.

В последние десятилетия перспективным направлением для синтеза адаптивного управления становится обучение с подкреплением [6]. В рамках данного подхода настройка параметров осуществляется в результате оценки эффективности того или иного действия с помощью функции вознаграждения. Совместное применение методов обучения с подкреплением и глубоких нейронных сетей показывает высокую эффективность в задачах управления нелинейными динамическими объектами. Однако существует несколько проблем, ограничивающих применение такого подхода. Первая проблема заключается в необходимости обеспечения асимптотической устойчивости желаемой траектории движения замкнутой системы. Данная проблема требует строго математического обоснования, что ограничивает способы параметризации алгоритма управления. Вторая проблема заключается в том, что в ходе настройки регулятор должен обеспечить нахождение замкнутой системы в заданной, безопасной для функционирования, области. Третья проблема заключается в большом количестве настраиваемых параметров, включающих выбор числа слоев и числа нейронов в нейронной сети, шага и гиперпараметров обучения, ограничений на приращение градиента настраиваемых параметров и др.

В данной работе исследуется широко распространенный метод Actor-Critic [6] в задаче управления нелинейными динамическими объектами. На основе проведенного анализа предлагается алгоритм адаптивного управления, включающий номинальный и адаптивный регулятор. В качестве номинального регулятора используется управление, синтезированное на основе квазилинейной математической модели [7, 8]. Данный метод отличается тем, что он не накладывает ограничений на структуру управляемого объекта и может применяться как для аффинных, так и для неаффинных по управлению объектов. В качестве адаптивного управления предложен модифицированный алгоритм Actor-Critic, в котором устранена неопределенность в окрестности нуля, введен параметр, позволяющий автоматически стабилизировать процесс настройки, предложена и исследована структура δ -ошибки.

Обзор работ в области адаптивного управления на базе обучения с подкреплением. Проблема адаптивного управления нелинейными неопределенными объектами с использованием методов обучения с подкреплением активно исследуется в настоящее время. Обзор работ показывает, что метод ценности состояния применяется намного реже, что связано с необходимостью реализации длительной процедуры предварительного обучения [9, 10]. Наиболее часто используемым подходом является применение методов градиента стратегии [11–15].

Анализ работ показывает, что наиболее актуальной темой является проблема адаптивного управления нелинейными объектами [11–20, 22, 24, 26, 27]. Для нелинейной постановки характерно использование моделей блочного вида [11, 12, 17, 18] и аффинных по управлению моделей [12–18, 23, 24].

Так в статье [11] для дискретной модели, при выполнении условий дифференцируемости и управляемости, предложен метод адаптивного управления, базирующийся на структуре Actor-Critic. Решается задача оптимизации критерия качества в виде взвешенной суммы ошибки слежения за уставкой. Для оценки значения критерия качества используется нейронная сеть Critic, а для аппроксимации оптимального управления – нейронная сеть Actor. Обе нейронные сети являются однослойными и используют радиально-базисные функции для аппроксимации. В работе доказано свойство абсолютной ограниченной устойчивости (Uniformly Ultimate Boundedness Stability – UUB). Данное свойство гарантирует, что через заданное время переменные состояния системы войдут в некоторую ограниченную область и будут оставаться там в дальнейшем.

В работе [12] рассматривается нелинейный объект второго порядка блочной структуры, аффинный по управлению. Вектор переменных состояния считается измеряемым и ограничен заданной областью. Нелинейности непрерывны и дифференцируемы. Также

присутствует ограниченное внешнее возмущение, приведенное ко входу объекта. Для синтеза управления в статье используется архитектура Actor-Critic. Для аппроксимации неизвестной нелинейности, общей функции стоимости и производной задающего сигнала используются нейронные сети, выходы которых определяют адаптивное управление. Показано свойство UUB и приведены два численных примера.

В работе [17] рассматриваются непрерывные уравнения движения надводного судна. В уравнениях динамики учтена неопределенность демпфирующей матрицы и введена немоделируемая динамика. Предложен адаптивный закон управления, который использует нейронные сети для идентификации неопределенной динамики и оценки оптимального значения критерия качества. Вводятся барьерные функции, которые ограничивают область, в которой находятся переменные состояния объекта. Доказывается свойство UUB в замкнутой системе управления. Приводятся результаты моделирования, подтверждающие эффективность предложенного метода управления.

В работе [18] рассматривается задача управления колесным роботом, который описывается уравнениями твердого тела. В модель объекта вводится неопределенность, обусловленная действием сил трения и матрицей инерции. В результате получена нелинейная аффинная по управлению модель с возмущениями. Для решения задачи оптимального по интегральному критерию качества управления используется структура Actor-Critic. Как и в других статьях, алгоритм Critic использует однослойную нейронную сеть для оценки оптимального значения критерия качества. Адаптивное управление также аппроксимируется однослойной нейронной сетью (Actor). Предлагаются градиентные алгоритмы настройки нейронных сетей, использующие метод обучения с подкреплением. В результате анализа устойчивости показано свойство UUB. Приводятся результаты численного моделирования.

В работах [12–18, 23, 24], кроме блочной структуры, рассматривается случай, когда управление входит в уравнения объекта линейно.

В статье [13] рассмотрен объект с приведенным ко входу ограниченным возмущением. Нелинейность является липшицевой, а норма вектора входа ограничена. Предлагается управление, использующее структуру Actor-Critic. Для аппроксимации неопределенных нелинейностей объекта и алгоритмов Actor и Critic используются однослойные нейронные сети, параметры которых настраиваются градиентным методом. Показано свойство UUB и приведен пример моделирования системы мостового крана с грузом, подвешенным на тележке, которая движется по рельсу. Особенностью статьи является синтез управления, которое изменяется по событиям.

В работе [14] делаются предположения, что нелинейности удовлетворяют условию Липшица и ограничены по норме. Для синтеза управления используется оценка значения критерия качества однослойной нейронной сетью. Алгоритм настройки параметров данной нейронной сети базируется на процедуре адаптивного динамического программирования. При этом синтезированное управление также изменяется по событиям. В статье показано свойство UUB и приводятся примеры синтеза регуляторов для линейных объектов четвертого порядка.

В статье [15] рассматривается сеть взаимосвязанных нелинейных объектов, описываемых непрерывной моделью. Предполагаются единственность положения равновесия, липшицевость системной нелинейности и матрицы взаимосвязей объекта, а также ограниченность нормы вектора входа. Для аппроксимации оптимального значения критерия качества используется однослойная нейронная сеть, параметры которой настраиваются из условий UUB. Приводится пример синтеза управления для системы из двух объектов второго порядка. Кроме того, что рассматривается управляемое событиями управление, условие изменения управления является динамическим.

В статье [16] рассмотрена нелинейная система с неопределенным вектором состояния и ограниченным по норме возмущением. Неопределенный вектор удовлетворяет условиям Липшица. Адаптивное управление строится с использованием структуры Actor-Critic, причем каждый из указанных алгоритмов реализован однослойной нейронной сетью с радиально-базисными функциями. В данной статье также доказано

свойство UUB. Эффективность предлагаемого метода демонстрируется на примере системы из двух перевернутых маятников, соединенных пружиной. Приводятся результаты численных расчетов.

Авторы работы [23] рассматриваются марковский процесс принятия решений, описываемый нелинейной дискретной системой. Исследуются два алгоритма обучения с подкреплением, оптимизирующие сумму обесцененных вознаграждений за все время функционирования системы. Первый алгоритм – офф-лайн Actor-Critic алгоритм, а второй – онлайн алгоритм оптимизации доверительного региона. Нелинейная неопределенная динамика объекта моделируется Гауссовским процессом, который находится в заданной области. Для обеспечения безопасности процесса обучения вводятся барьерные функции. С использованием данных функций предлагается управление, которое настраивается на основе метода обучения с подкреплением. Доказаны теоремы о том, что безопасная область является инвариантом для замкнутой системы.

В статье [24] также используются барьерные функции для обеспечения безопасности процесса обучения. Вводится номинальная модель динамики и синтезируется базовый регулятор с использованием барьерных функций Ляпунова. Далее предлагается реализация адаптивного управления с использованием барьерных функций и базового регулятора. Эффективность предложенных алгоритмов демонстрируется на примере обучения двуногого робота.

В работах [11, 19, 20, 22, 26, 27] рассматриваются неаффинные по управлению объекты.

В статье [19] рассмотрена дискретная модель, для которой синтезируется адаптивное управление, использующее структуру Actor-Critic. При этом используются двухслойные нейронные сети с линейной функцией активации во входном слое и нелинейной функцией активации в выходном слое. В статье показана асимптотическая устойчивость замкнутой системы, однако это свойство показано при условии, что все переменные состояния ограничены. В частности, приведен пример неаффинной системы второго порядка, в которой все переменные ограничены функциями тангенс гиперболический.

Авторы работы [20] рассматривают нелинейную дискретную модель общего вида. Предполагается, что правая часть может быть представлена в виде суммы известного и неизвестного векторов. Также предполагается выполнение условий Липшица для правых частей уравнений объекта. Дополнительно делается достаточно сильное предположение о том, что норма разности между правой частью объекта и некоторым средним её значением с заданной вероятностью меньше известного положительного числа. Для этих условий находится функция Ляпунова и ограниченная область устойчивости. Таким образом гарантируется безопасность процесса обучения.

В работе [22] ставится задача найти адаптивное управление, оптимизирующее заданный интегральный критерий качества. Предлагается базовый алгоритм, обеспечивающий асимптотическую устойчивость положения равновесия системы. Для неопределенной системы вводятся две нейронные сети. Рекуррентная нейронная сеть предложена для идентификации объекта, а для оценки критерия качества – однослойная нейронная сеть. На основе метода обучения с подкреплением предлагаются алгоритмы настройки коэффициентов нейронных сетей. В статье показано свойство UUB и ограниченность ошибок оценивания.

В статье [26] рассматривается нелинейный объект, представленный непрерывной моделью с чистыми обратными связями. Нелинейные функции правой части или уравнения выхода? считаются неопределенными. Кроме того, введены аддитивные ограниченные по амплитуде возмущения. Вводится адаптивное управление, использующее однослойные нейронные сети с радиально-базисными функциями активации. Проведен анализ устойчивости, который показал ограниченность сигналов в замкнутой системе. Приводятся результаты моделирования на примере звена робота, управляемого двигателем постоянного тока.

Авторы статьи [27] ставят задачу оптимизировать интегральный критерий качества в условиях, когда вектор правых частей не известен, но является гладким. Для синтеза адаптивного управления, аналогично работе [22], используется рекуррентная нейронная

сеть для идентификации объекта управления, а для оценки оптимального значения критерия качества – однослойная нейронная сеть Critic. Предложены градиентные алгоритмы настройки весовых коэффициентов нейронных сетей и показана ограниченность ошибок замкнутой системы.

В статьях [21, 28] модель объекта представляется в виде марковского процесса.

В статье [21] рассматривается случайный марковский процесс принятия решений роботом. Робот характеризуется множеством состояний и множеством возможных действий. Переход из одного состояния в другое при заданном действии описывается некоторой вероятностью. Целью является поиск алгоритма, обеспечивающего переход в нулевое состояние или слежение за заданным сигналом. Делается предположение об эргодичности и стационарности случайного марковского процесса и для алгоритма обучения Actor-Critic находятся условия сходимости в среднем, которые эквивалентны условию устойчивости по Ляпунову.

В работе [28] также рассматривается марковский процесс принятия решений, который характеризуется вероятностью перехода из одного состояния в другой при заданном действии. Формулируется проблема нахождения алгоритма, оптимизирующего сумму обесцененных вознаграждений. Предлагается структура системы управления, в которой используется управление с прогнозирующей моделью и блоком обеспечения выполнения ограничений, использующий обучение с подкреплением. Предлагаемые алгоритмы демонстрируются на примере управления системой второго порядка.

Также рассматриваются постановки задач, в которых модель является линейной [25, 29].

В работе [25] рассматривается дискретная линейная стационарная система с управлением по состоянию. Ставится задача определить вектор параметров управления, минимизирующий квадратичный функционал качества. Для решения поставленной задачи в условиях неопределенности предлагается алгоритм, базирующийся на Q-методе обучения с подкреплением. В статье доказывается сходимость алгоритма настройки и устойчивость замкнутой системы.

В статье [29] также рассматривается неопределенная линейная стационарная система. Ставится задача синтезировать управление, минимизирующее сумму вознаграждений за весь период функционирования системы. Для решения задачи, как и в [25], используется Q-метод обучения с подкреплением. На примере решения задачи квадратичной оптимизации показано схождение к оптимальному решению и асимптотическая устойчивость замкнутой системы.

Отметим, что в большинстве работ ставится задача управления состоянием объектов [13–16, 19, 20, 22, 23, 28–30]. Реже рассматривается задача управления выходом [7, 11, 12, 17, 25, 26].

В работах [30, 33] исследуются процессы сходимости процесса обучения глубоких нейронных сетей.

В работе [30] исследуется глубокая нейронная сеть, используемая для управления нелинейной аффинной по управлению дискретной системой. Ставится задача минимизации суммарного вознаграждения в течение всего времени функционирования системы. Для этого предлагается метод глобального эвристического программирования. Для аппроксимации указанного алгоритма используется многослойная нейронная сеть прямого распространения. Проводится анализ сходимости, в результате которого показано свойство UUB.

В работе [33] исследуется проблема адаптивного управления с использованием искусственных нейронных сетей. Предлагается метод синтеза нейронного регулятора, который гарантирует устойчивость желаемого положения замкнутой системы управления для объектов с существенными нелинейностями, такими как насыщение, упор и другие.

В работе [31] рассматривается проблема управления объектом с транспортным запаздыванием. Методами численного моделирования показана эффективность метода градиента политики (алгоритма управления) для компенсации транспортного запаздывания в системе первого порядка.

В статье [32] авторы рассматривают задачу перехвата подвижного объекта, который движется по прямолинейной или круговой траектории. Для ее решения используется метод Actor-Critic. При этом для решения проблемы сходимости при одновременном исследовании и управлении используется копирование сетей Actor и Critic с добавлением шума в управление, формируемое алгоритмом Actor.

Результаты проведенного обзора сведены в табл. 1, которая демонстрирует ключевые направления и методы исследований.

Таблица 1

Результаты анализа методов управления

Постановка задачи, метод	Статья
Блочная форма	[11], [12], [17], [18], [26]
Аффинные по управлению объекты	[12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [23], [24], [25], [29]
Объекты общего вида	[19], [20], [21], [22], [27]
Структура Actor-Critic	[11], [12], [13], [16], [18], [19], [21], [23]
Структура Critic + НС идентификатор	[17], [22], [27]
Только Critic	[14], [15]
Однослойные НС	[11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [22], [27], [28]
Многослойные НС	[19], [30], [33]
Доказательство ограниченности ошибки, свойство UUB	[11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [30]
Барьерные функции	[23], [24]
Обновляемое по событиям управление	[13], [14], [15], [22], [27]

Из табл. 1 следует, что наиболее часто рассматриваются модели с ограничениями по структуре (блочные, аффинные по управлению). Такие модели могут ограничивать класс рассматриваемых объектов. Например, неаффинность по управлению характерна для многих летательных и подводных аппаратов [34, 35].

Также заметно активное использование структуры метода обучения с подкреплением Actor-Critic, что объясняется ее близостью к структуре адаптивных систем управления с самонастраивающимися параметрами.

Отметим, что в большинстве случаев используются однослойные нейронные сети, которые позволяют провести анализ устойчивости.

Также отметим, что в нелинейных системах применение методов обучения с подкреплением обеспечивает ограниченность всех сигналов. Свойство UUB гарантирует нахождение сигналов в заданной области, но только по завершению процесса обучения. Свойство асимптотической устойчивости обеспечивается при дополнительных предположениях и ограничениях. В этом методы обучения с подкреплением сходны по результатам с известными алгоритмами адаптивного управления.

Постановка задачи, предварительные результаты и методика исследования.

Рассматривается нелинейный неаффинный объект, описываемый уравнениями вида [7]

$$\dot{x} = \zeta(x, u, v) + \Delta(x, u, v), \quad y = \xi(x, u), \quad (1)$$

где $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]$ – вектор переменных состояния размерности n ; u – управление; v – возмущение; y – управляемый выход объекта; $\zeta(x, u, v)$ – дифференцируемая по всем переменным, управлению и возмущению нелинейная вектор-функция размерности n ; $\xi(x, u)$ – дифференцируемая по всем переменным и управлению скалярная функция; $\Delta(x, u, v)$ – неизвестная нелинейная вектор-функция размерности n , отражающая параметрическую неопределенность и немоделируемую динамику системы.

Предполагается, что вектор x и задающее воздействие $r(t)$ являются измеряемыми. Также предполагается, что $\zeta(0, 0, 0) = 0, \xi(0, 0) = 0$. Отметим, что модель (1) является неаффинной как по управлению, так и по возмущению.

Ставится задача определить закон управления вида

$$u = u_1(r, x) + u_2(e_t), \quad (2)$$

где $u_1(r, x)$ – номинальное управление, синтезируемое по модели (1) при $\Delta(x, u, v) = 0$; $u_2(e)$ – адаптивное управление, компенсирующее ошибку $e_t = r - x$, обусловленную действием возмущения $\Delta(x, u, v)$.

Управление $u_1(r, x)$ должно обеспечивать асимптотическую устойчивость нулевого положения $x = 0$ объекта (1) при $\Delta(x, u, v) = 0$. Дополнительно при $r = r_0 1(t)$ ошибка должна стремиться к нулю $e \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$. При этом время переходных процессов в номинальной системе не должно превышать заданного значения.

В данной работе управление $u_1(r, x)$ синтезируется методом А.Р. Гайдука на основе квазилинейных моделей [7, 8, 36]. Согласно этому методу, модель (1) при $\Delta(x, u, v) = 0$ представляется квазилинейной моделью вида

$$\dot{x} = A(x)x + b(x, u)u + h(x, u, v)v, \quad y = c^T(x)x + d(x, u)u, \quad (3)$$

где

$$A(x) = \begin{bmatrix} a_{11}(x) & a_{12}(x) & \dots & a_{1n}(x) \\ a_{21}(x) & a_{22}(x) & \dots & a_{2n}(x) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}(x) & a_{n1}(x) & \dots & a_{nn}(x) \end{bmatrix}, \quad b(x, u) = \begin{bmatrix} b_1(x, u) \\ b_2(x, u) \\ \vdots \\ b_n(x, u) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$h(x, u, v) = \begin{bmatrix} h_1(x, u, v) \\ h_2(x, u, v) \\ \vdots \\ h_n(x, u, v) \end{bmatrix}, \quad c^T(x) = [c_1(x) \ c_2(x) \ \dots \ c_n(x)]. \quad (5)$$

В работе [7] приведены выражения для вычисления коэффициентов матрицы и векторов в выражениях (4), (5). Отметим, что квазилинейная модель (3) точно описывает исходную модель (1) и не накладывает ограничений на структуру объекта.

В работе [7] подробно описана процедура синтеза и условиях разрешимости задачи синтеза управления. К таким условиям относятся выполнение критерия управляемости по состоянию и выполнение критерия управляемости по выходу.

В настоящей статье исследуется проблема синтеза адаптивного управления $u_2(e)$. Согласно проведенному анализу распространенным подходом к синтезу управления является использование метода обучения с подкреплением на основе архитектуры Actor-Critic. В работе [6] представлен базовый алгоритм Actor-Critic. В статье [37] для линейной системы блочного вида на основе базового алгоритма Actor-Critic предложена структура адаптивного регулятора в виде:

$$u_2(e_t) = u_{max} \tanh(k_t e_t), \quad (6)$$

где u_{max} – заданное положительное число, k_t – коэффициент, настраиваемый согласно Q-методу обучения с подкреплением.

В данной работе в силу нелинейности исходного объекта нет оснований принимать линейную структуру регулятора, поэтому предлагается использовать аппроксимацию управления радиально-базисными функциями. В этом случае адаптивное управление принимает вид

$$u_2(e_t) = u_{max} \tanh(w_t^T \Phi_t), \quad (7)$$

$$\Phi_t = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{Na}]^T, \quad (8)$$

$$\phi_i = \exp(-\beta_i(e_t - c_i)^2), \quad i = \overline{1, Na}, \quad (9)$$

$$e_t = r(t) - y, \quad (10)$$

где Φ_t – вектор радиально-базисных функций (функций Гаусса); Na – число радиально-базисных функций (РБФ); β_i, c_i – положительные параметры.

Базовый алгоритм настройки вектора параметров w_t согласно [6] имеет вид

$$w_{t+1} = \begin{cases} w_t - \text{satur}_{\varepsilon_{lim}} \left[\frac{\alpha_w \delta_t^2 \nabla u_2}{u_2} \right], & |u_2| > \varepsilon_{grad}, \\ w_t, & |u_2| \leq \varepsilon_{grad}, \end{cases} \quad (11)$$

$$\nabla u_2 = u_{\max} \Phi_{it} / \cosh^2(w_t^T \Phi_t). \quad (12)$$

где $\text{satur}_{\varepsilon_{lim}}$ – функция ограничения; δ_t – дельта-ошибка; α_w – шаг обучения; ε_{grad} – малый положительный параметр, вводимый для обхода сингулярности в точке $u_2 = 0$; ε_{lim} – положительный параметр, ограничивающий величину изменения настраиваемых параметров на одном шаге.

В данной работе предлагается модификация алгоритма настройки (11), (12), в которой устраняется сингулярность в точке $u_2 = 0$ и уменьшается число настраиваемых параметров. Также исследуются различные варианты определения ошибки δ_t .

Для сравнения различных алгоритмов используется нелинейная неаффинная система следующего вида [7]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + a_1 x_1 \cos(x_1 - 1), \\ \dot{x}_2 = -a_2 x_2 - a_3 \cos(x_2 - 1) - a_4 \sin(x_1 + \beta + u_1) + \beta + u_1, \end{cases} \quad (13)$$

где $a_1 = a_{10} + d_{a1}$, $a_{10} = 0.5$, $d_{a1} \in [-0.6 \ 0.6]$, $a_2 = a_{20} + d_{a2}$, $a_{20} = 0.2$, $d_{a2} \in [-0.4 \ 0.4]$, $a_3 = a_{30} + d_{a3}$, $a_{30} = 0.1$, $d_{a3} \in [-0.2 \ 0.2]$, $a_4 = a_{40} + d_{a4}$, $a_{40} = 4.9$, $d_{a4} \in [-6.0 \ 6.0]$.

В качестве номинального управления выбрано $u_1(r, x)$ используется управление из примера 4 работы [7].

Для того, чтобы устранить неопределенность в окрестности $u_2 \approx 0$ введем алгоритм настройки коэффициентов в виде

$$w_{t+1} = w_t - \alpha_w \delta_t \nabla u_2 \text{sign}(u_2). \quad (14)$$

Отметим, что алгоритм (14) требует только настройки параметра α_w в отличие от исходного алгоритма (11), в котором необходимо выбирать дополнительно ε_{grad} и ε_{lim} .

Отметим, что устойчивость системы (1) с номинальным управлением доказана в работе [7]. Так как алгоритм адаптивного управления (7)–(10), (12), (14) имеет дискретную природу, то представим модель (3) в дискретной форме

$$x_{t+1} = x_t + dt(A(x_t)x_t + b(x_t, u_{2t})u_{2t} + h(x_t, u_{2t}, v_t)v_t). \quad (15)$$

Рассмотрим следующую квадратичную функцию

$$V_t = x_t^T x_t + w_t^T w_t. \quad (16)$$

Вычислим приращение

$$\Delta V_t = V_{t+1} - V_t = x_{t+1}^T x_{t+1} + w_{t+1}^T w_{t+1} - x_t^T x_t - w_t^T w_t.$$

Принимая во внимание уравнения (14), (15) получаем

$$\begin{aligned} \Delta V_t = & [x_t + dt(A(x_t)x_t + b(x_t, u_{2t})u_{2t} + h(x_t, u_{2t}, v_t)v_t)]^T [x_t + dt(A(x_t)x_t + \\ & b(x_t, u_{2t})u_{2t} + h(x_t, u_{2t}, v_t)v_t)] + [w_t - \alpha_w \delta_t u_{\max} \Phi_{it} / \cosh^2(w_t^T \Phi_t) \text{sign}(u_2)]^T [w_t - \\ & \alpha_w \delta_t u_{\max} \Phi_{it} / \cosh^2(w_t^T \Phi_t) \text{sign}(u_2)] - x_t^T x_t - w_t^T w_t. \end{aligned}$$

Для стандартной дельта-ошибки $\delta_t = e_t^2 + \gamma e_t^2 - e_{t-1}^2$ при достаточно малом шаге dt и $r(t) = 0$, $\delta_t \approx -x_t^2$. Также учтем, что $\text{sign}(u_2) = \text{sign}(w_t^T \Phi_t)$. Тогда последнее выражение принимает вид

$$\Delta V \approx -2\alpha_w u_{\max}^2 x_t^T x_t \frac{|w_t^T \Phi_t|}{\cosh^2(w_t^T \Phi_t)} + \frac{\alpha_w^2 (x_t^T x_t)(x_t^T x_t) u_{\max}^4 \Phi_t^T \Phi_t}{\cosh^4(w_t^T \Phi_t)}. \quad (17)$$

В силу того, что $0 < \phi_{it} \leq 1$, можно заменить $\Phi_t^T \Phi_t$ на число Na . Также рассмотрим область $|x_t| \leq x_{\max}$. Тогда получим условие отрицательности приращения (17)

$$n \frac{\alpha_w x_{\max}^2 u_{\max}^2 Na}{\cosh^2(w_t^T \Phi_t)} < |w_t^T \Phi_t|. \quad (18)$$

Из выражения (18) следует, что в начальный момент времени при малых значениях элементов вектора w_t неравенство (18) не выполняется. Однако в ходе настройки значения элементов вектора w_t растут. Это приводит к уменьшению левой части и увеличению правой части неравенства (18). В некоторый момент времени оно начнет выполняться, и функция ΔV станет отрицательно полуопределенной. Таким образом, в замкнутой системе выполняется условие UUB.

Результаты. Рассмотрим результаты численного моделирования системы (13), (2), (6)–(12). Эта система соответствует случаю, когда адаптивное управление синтезируется согласно исходному алгоритму Actor-Critic. Дельта-ошибку сформируем согласно Q-методу обучения: $\delta_t = e_t^2 + \gamma e_t^2 - e_{t-1}^2$, где γ – коэффициент обесценивания.

Система управления с номинальным управлением u_1 сохраняет устойчивость системы, но присутствует статическая ошибка, обусловленная параметрической неопределенностью, как показано на рис. 1.

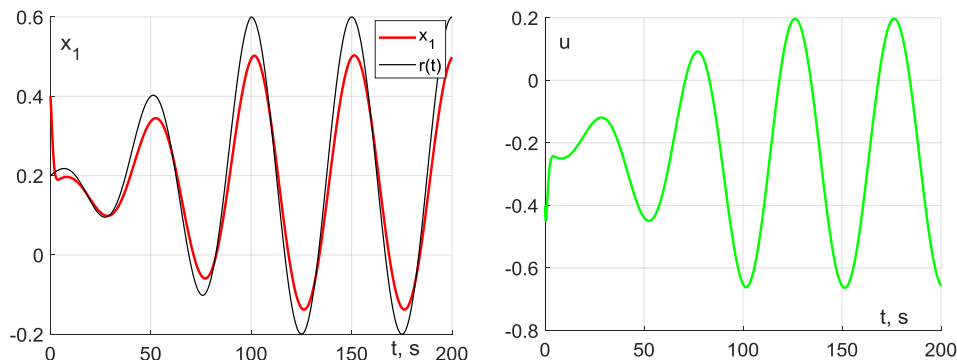


Рис. 1. Переходные процессы в системе с номинальным управлением $u = u_1(r, x)$

На рис. 1 задающий сигнал определяется выражением

$$r(t) = \begin{cases} 0.2 + 0.004t \sin(0.04\pi t + 0.5\pi), & t \leq 100, \\ 0.2 + 0.4 \sin(0.04\pi t + 0.5\pi), & t > 100. \end{cases} \quad (19)$$

Ошибка слежения для пиковых значений задающего сигнала составляет 0,1.

На рис. 2 представлены результаты моделирования системы (13), (2), (6)–(12) при $\alpha_w = 10^{-5}$, $\varepsilon_{lim} = 0.002$, $\varepsilon_{grad} = 10^{-6}$, $u_{\max} = 0.5$. На рис. 2 хорошо заметны моменты перехода адаптивного управления u_2 через ноль. Они приводят к резким непредсказуемым изменениям выходной переменной и ошибкам слежения.

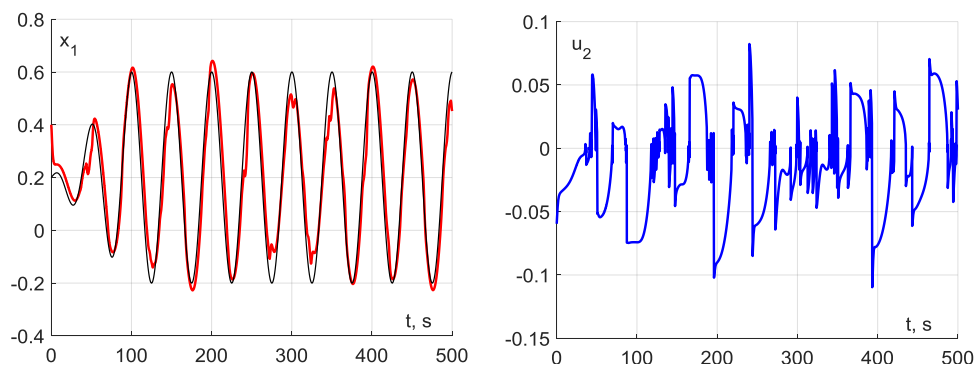


Рис. 2. Переходные процессы в системе (13), (2), (6)–(12)

Таким образом, исходный алгоритм настройки (12) обладает существенными недостатками, связанными с наличием особенности в точке $u_2 = 0$. Исследования показывают, что можно добиться некоторого снижения ошибки слежения за задающим сигналом. Однако, в целом, отмеченная проблема сохраняется при разных настройках параметров.

В частности, модификация дельта-ошибки к виду $\delta_t = e_t^2 + \alpha_{w1}(e_t^2 - e_{t-1}^2)$ и настройка параметров позволяет получить переходные процессы, представленные на рис. 3.

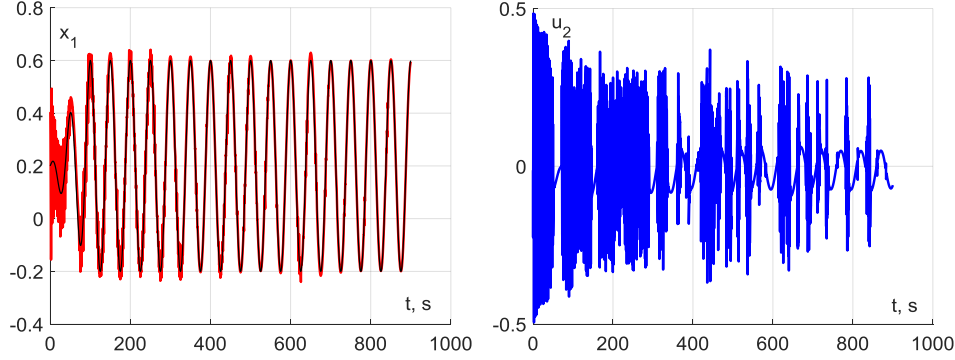


Рис. 3. Переходные процессы в системе (13), (2), (6)–(12) с ошибкой $\delta_t = e_t^2 + \alpha_{w1}(e_t^2 - e_{t-1}^2)$ при $\alpha_w = 0.01$, $\alpha_{w1} = 10000$, $\varepsilon_{lim} = 0.01$, $\varepsilon_{grad} = 10^{-7}$

Из рис. 3 видим, что ошибка слежения с течением времени убывает до значений меньше 0,01, однако наблюдаются высокочастотные колебания адаптивного управления.

Теперь исследуем систему управления с предложенным модифицированным алгоритмом настройки параметров, которая описывается уравнениями системы (13), (2), (6)–(10), (12), (14). На рис. 4 представлены результаты моделирования.

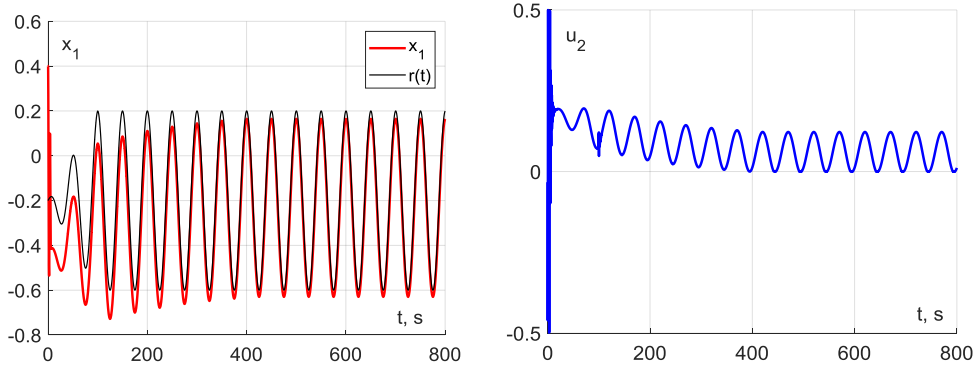


Рис. 4. Переходные процессы в системе (13), (2), (6) – (10), (12), (14) с ошибкой $\delta_t = e_t^2 + \alpha_{w1}(e_t^2 - e_{t-1}^2)$ при $\alpha_w = 0.01$, $\alpha_{w1} = 10000$

Проведенное моделирование показывает большую длительность настройки вектора параметров w_t . Для уменьшения длительности настройки предлагается использовать дельта-ошибку вида $\delta_t = e_t^2 - e_{t-1}^2$ и обучающие импульсы для настройки системы.

Результаты моделирования при задающем воздействии вида

$$r(t) = \begin{cases} \pm 0.5, & t \leq 30, \\ 0.2 + 0.002(t - 30) \sin(0.04\pi(t - 30) + 0.5\pi), & t > 30, \end{cases} \quad (20)$$

представлены на рис. 5.

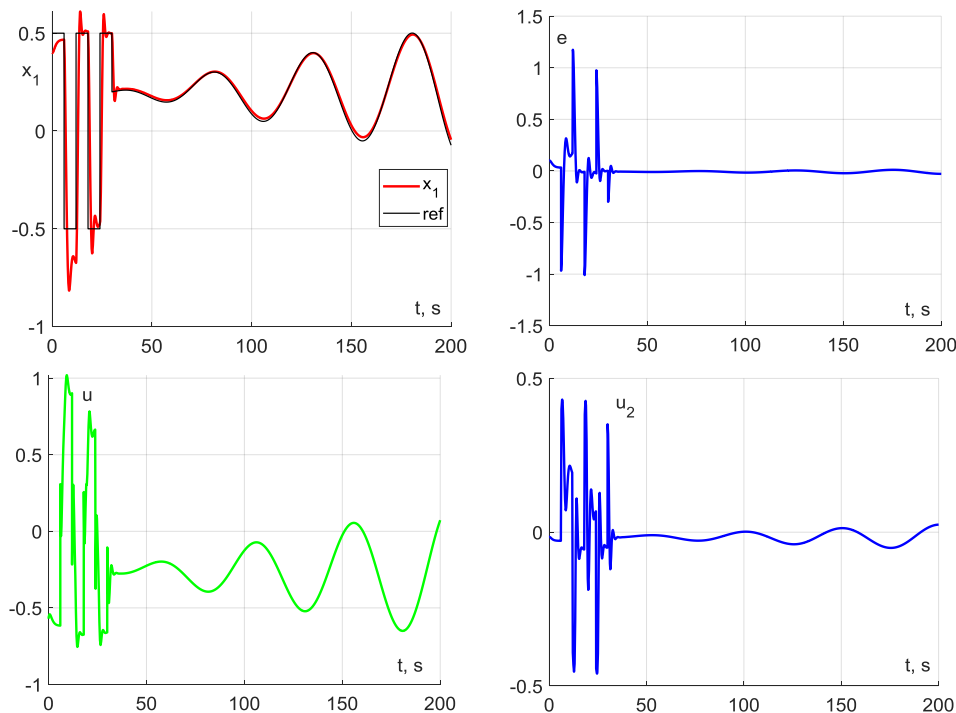


Рис. 5. Переходные процессы в системе (13), (2), (6)–(10), (12), (14) с ошибкой $\delta_t = e_t^2 - e_{t-1}^2$ при $\alpha_w = 1.0$

При моделировании число радиально-базисных функций взято равным 10.

Из рис. 5 видим, что для настройки системы достаточно несколько обучающих импульсов. В примере использовано 5 переходных процессов длительностью 6 секунд. Отметим, что обучающие импульсы должны иметь амплитуду, сравнимую с диапазоном возможного изменения ошибки.

Заключение. В статье проведен обзор и анализ базирующихся на методах обучения с подкреплением работ в области адаптивного управления нелинейными динамическими объектами. На основе проведенного анализа предложено для нелинейных неаффинных объектов формировать управление в виде совокупности номинального и адаптивного управления. Синтез адаптивного управления проведен на основе Q-метода обучения с использованием архитектуры Actor-Critic. Для аппроксимации неизвестной структуры адаптивного управления использована аппроксимация сетью радиально-базисных функций Гауссовского типа. Предложен модифицированный алгоритм настройки параметров сети, в котором, в отличие от оригинального Q-метода со структурой Actor-Critic, отсутствует особенность в нулевой точке.

Дальнейшие направления исследований связаны с оптимизацией режимов настройки адаптивной системы, исследованием различных критериев качества, используемых в адаптивном управлении, рассмотрением объектов с векторным входом и выходом. Необходимость решения указанных задач обусловлена тем, что не все объекты допускают подачу импульсов большой амплитуды. Также в данной статье в качестве критерия использовано мгновенное значение ошибки слежения за задающим сигналом. Во многих приложениях необходимо оптимизировать интегральные критерии, включающие также ограничения на производную ошибки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-61-00017, «Интеллектуальные методы траекторного управления робототехническими комплексами в условиях параметрических и внешних возмущений», <https://rscf.ru/project/25-61-00017/> на базе ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Zemlyakov S., Rutkovsky V.* Synthesizing self-adjusting control systems with a standard model // *Automation and Remote Control.* – 1966. – Vol. 27 (3). – P. 407-414.
2. *Parks P.* Liapunov Redesign of Model Reference Adaptive Control Systems // *IEEE Transactions on Automatic Control.* – 1966. – Vol. 11 (3). – P. 362-367.
3. *Стафейчук Б.Г., Шакирова А.Я.* Исследование адаптивной системы автоматического регулирования с применением нейросетевых технологий на имитационной модели реактора // *Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология.* – 2019. – № 2.
4. *Еременко Ю.И., Глуценко А.И., Фомин А.В.* О применении нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора на тепловых объектах горно-металлургической отрасли в режиме отработки возмущений // *ГИАБ.* – 2017. – № 12.
5. *Санталов А.А.* Нейросетевая настройка адаптивного ПИД-регулятора мощности гидроагрегата // *Вестник УЛГТУ.* – 2021. – № 3 (95).
6. *Саттон Р.С., Барто Э.Дж.* Обучение с подкреплением: Введение. – 2-е изд.: пер. с англ. А.А. Слинкина. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 552 с.
7. *Gaiduk A.R., Medvedev M.Y. and Pshikhov V.K.* Design Method of Quasilinear Nonaffine Nonlinear Control Systems of General Structure // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering.* – 2025. – Vol. 22. – P. 20208-20220.
8. *Гайдук А.Р., Медведев М.Ю., Пишихов В.Х., Гусцов В.Г.* Синтез неаффинных нелинейных систем управления на основе квазилинейных моделей // *Мехатроника, автоматизация, управление.* – 2025. – 26(5). – С. 223-232. – <https://doi.org/10.17587/mau.26.223-232>.
9. *Карпеев А.Н., Косенко Е.Ю., Медведев М.Ю., Пишихов В.Х.* Исследование интеллектуального адаптивного алгоритма управления на базе метода обучения с подкреплением // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2025. – № 2. – С. 162-175.
10. *Медведев М.Ю., Пишихов В.Х., & Евдокимов И.Д.* Алгоритм робастного управления одномерным динамическим объектом на основе табличного Q-метода обучения с подкреплением // *Информатика и автоматизация.* – 2025. – 24(3). – P. 717-744. – <https://doi.org/10.15622/ia.24.3.1>.
11. *Xu B., Yang C. and Shi Z.* Reinforcement Learning Output Feedback NN Control Using Deterministic Learning Technique // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems.* – 2014. – Vol. 25 (3). – P. 635-641. – DOI: 10.1109/TNNLS.2013.2292704.
12. *Mu C., Ni Z., Sun C., and He H.* Data-driven tracking control with adaptive dynamic programming for a class of continuous-time nonlinear systems // *IEEE Transactions on Cybernetics.* – 2016. – Vol. 47 (6). – P. 1460-1470. – DOI: 10.1109/TCYB.2016.2548941.
13. *Wang A., Liao X., Dong T.* Event-driven optimal control for uncertain nonlinear systems with external disturbance via adaptive dynamic programming // *Neurocomputing.* – 2018. – Vol. 281. – P. 188-195. – DOI: 10.1016/j.neucom.2017.12.010.
14. *Biao Luo, Yin Yang, Derong Liu, and Huai-Ning Wu.* Event-Triggered Optimal Control with Performance Guarantees Using Adaptive Dynamic Programming // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems.* – 2020. – Vol. 31(1). – P. 76-88. – DOI: 10.1109/TNNLS.2019.2899594.
15. *Yang X., Xu M. and Wei Q.* Dynamic Event-Sampled Control of Interconnected Nonlinear Systems Using Reinforcement Learning // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems.* – 2024. – Vol. 35(1). – P. 923-937. – DOI: 10.1109/TNNLS.2022.3178017.
16. *Zhang H., Zhao X., Wang H., Zong G. and Xu N.* Hierarchical Sliding-Mode Surface-Based Adaptive Actor-Critic Optimal Control for Switched Nonlinear Systems With Unknown Perturbation // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems.* – 2024. – Vol. 35(2). – P. 1559-1571. – DOI: 10.1109/TNNLS.2022.3183991.
17. *Dong C., Chen L. and Dai S.-L.* Performance-Guaranteed Adaptive Optimized Control of Intelligent Surface Vehicle Using Reinforcement Learning // *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles.* – 2024. – Vol. 9 (2). – P. 3581-3592. – DOI: 10.1109/TIV.2023.3338486.
18. *Phuong Nam Dao, Minh Hiep Phung.* Nonlinear robust integral based actor-critic reinforcement learning control for a perturbed three-wheeled mobile robot with mecanum wheels // *Computers and Electrical Engineering.* – 2025. – Vol. 121. 109870. – DOI:10.1016/j.compeleceng.2024.109870.
19. *Ding Wang, Xin P., Ren J., and Qiao J.* Adaptive Critic Tracking Design for Data-Based Nonaffine Predictive Control // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering.* – 2024. – Vol. 21 (4). – P. 5534-5545. – DOI: 10.1109/TASE.2023.3313159.
20. *Berkenkamp F., Turchetta M., Schoellig A., Krause A.* Safe model-based reinforcement learning with stability guarantees // *Advances in Neural Information Processing Systems.* – 2017. – Vol. 30. – P. 908-918. – DOI: 10.48550/arXiv.1705.08551.

21. Han M., Zhang L., Wang J., Pan W. Actor-critic reinforcement learning for control with stability guarantee // *IEEE Robotics and Automation Letters*. – 2020. – Vol. 5 (4). – P. 6217-6224. – DOI: 10.1109/LRA.2020.3011351.
22. Zhou Z., Liu A., and Wang D. Improved adaptive-critic-based dynamic event-triggered control for non-affine systems // *Mechatronics Tech.* – 2024. – Vol. 1 (1). – DOI: 10.55092/mt20230002.
23. Cheng R., Orosz G., Murray R.M., Burdick J.W. End-to end safe reinforcement learning through barrier functions for safety critical continuous control tasks // *The Thirty-Third AAAI Conference on Artificial Intelligence*. – 2019. – P. 3387-3395.
24. Choi J., Castaneda F., Tomlin C.J., Sreenath K. Reinforcement learning for safety-critical control under model uncertainty, using control Lyapunov functions and control barrier functions // *Conference Robotics: Science and Systems*. – 2020.
25. Xue W., Lian B., Fan J., Kolaric P., Cha T., Lewis F. Inverse Reinforcement Q-Learning Through Expert Imitation for Discrete-Time Systems // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. – 2021. – P. 1-14. – DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3106635.
26. Yu Zhang, Niu B., Zhao X., Duan P., Wang H., and Gao B. Global Predefined-Time Adaptive Neural Network Control for Disturbed Pure-Feedback Nonlinear Systems with Zero Tracking Error // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. – 2023. – Vol. 34(9). – P. 6328-6338.
27. Wang D., Zhou Z., Li M., Ren J., and Qia J. Event-based robust performance guarantee for nonaffine plants via system identification // *International Journal Robust Nonlinear Control*. – 2023. – Vol. 33. – P. 53650-5387. – DOI: 10.1002/rnc.6646.
28. Zanon M. Gros S. Safe Reinforcement Learning Using Robust MPC // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 2020. – P. 1-1. – DOI: 10.1109/TAC.2020.3024161.
29. Rizvi S. A.A., Lin Z. Output Feedback Q-Learning Control for the Discrete-Time Linear Quadratic Regulator Problem // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. – 2018. – P. 1-14. – DOI: 10.1109/TNNLS.2018.2870075.
30. Kim J.W., Oh T.H., Son S.H., Jeong D.H., Lee J.M. Convergence analysis of the deep neural networks based globalized dual heuristic programming // *Automatica*. – 2020. – Vol. 122. – DOI: 10.1016/j.automatica.2020.109222.
31. Боровик В.С., Шидловский С.В. Обучение с подкреплением в системах управления объектами с транспортным запаздыванием // *Автометрия*. – 2021. – Т. 57(3). – С. 48-57. – DOI: 10.15372/AUT20210306.
32. Галеев А.А., Медведев А.И., Насонов И.А. Нейросетевой алгоритм перехвата машиной Дубинса целей, движущихся по известным траекториям // *Автоматика и телемеханика*. – 2023. – № 3. – С. 3-21. – DOI: 10.31857/S0005231023030017.
33. Ханкин Д.Л., Феофилов С.В. Синтез устойчивых нейросетевых регуляторов для объектов с ограничителями в условиях неполной информации // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2024. – Vol. 25(7). – P. 345-353. – <https://doi.org/10.17587/mau.25.345-353>.
34. Pshikhov V., Krukhmalev V., Medvedev M., and Neydorf R. Estimation of Energy Potential for Control of Feeder of Novel Cruiser/Feeder MAAT System // *SAE Technical Paper*. – 2012. – Vol. 2012-01-2099. – doi: 10.4271/2012-01-2099.
35. Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., Нейдорф Р.А., Беляев В.Е., Федоренко Р.В., Костюков В.А., Крухмалев В.А. Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: алгоритмы управления // *Мехатроника, автоматизация и управление*. – 2013. – № 7. – С. 13-20.
36. Гайдук А.Р., Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю., Гисцов В.Г. Непрерывное управление нелинейными неаффинными объектами // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2024. – № 1 (237). – С. 122-133.
37. Медведев М.Ю., Пилюхов В.Х., Медведев И.М. Алгоритмы адаптивного управления каскадными динамическими объектами на базе метода обучения с подкреплением // *Мехатроника, автоматизация и управление*. – 2026. – № 3.

REFERENCES

1. Zemlyakov S., Rutkovsky V. Synthesizing self-adjusting control systems with a standard model, *Automation and Remote Control*, 1966, Vol. 27(3), pp. 407-414.
2. Parks P. Liapunov Redesign of Model Reference Adaptive Control Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1966, Vol. 11(3), pp. 362-367.
3. Stafeychuk B.G., Shakirova A.Ya. Issledovanie adaptivnoy sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya s primeneniem neyrosetevykh tekhnologiy na imitatsionnoy modeli reaktora [Study of an adaptive automatic control system using neural network technologies on a simulation model of a reactor], *Vestnik PNIPU. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya* [Bulletin of PNIPU. Chemical technology and biotechnology], 2019, No. 2.

4. Eremenko Yu.I., Glushchenko A.I., Fomin A.V. O primeneniі neyrosetevogo nastroyshchika parametrov PI-regulyatora na teplovykh ob'ektakh gorno-metallurgicheskoy otrasli v rezhime otrabotki vozmushcheniy [On the use of a neural network tuner for PI controller parameters at thermal facilities in the mining and metallurgical industry in the disturbance processing mode], *GIAB* [GIAB], 2017, No. 12.
5. Santalov A.A. Neyrosetevaya nastroyka adaptivnogo PID-regulyatora moshchnosti gidroagregata [Neural network tuning of an adaptive PID controller for the power of a hydroelectric unit], *Vestnik UIGTU* [Bulletin of UISTU], 2021, No. 3 (95).
6. Sutton R.S., Barto E.Dzh. Obucheniye s podkreplenіem: Vvedeniye [Reinforcement Learning: An Introduction. 2nd ed.: transl. from Engl. A.A. Slinkina. Moscow: DMC Press, 2020, 552 p.
7. Gaiduk A.R., Medvedev M.Y. and Pshikhopov V.K. Design Method of Quasilinear Nonaffine Nonlinear Control Systems of General Structure, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2025, Vol. 22, pp. 20208-20220.
8. Gayduk A.R., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., Gistsov V.G. Sintez neaffinnykh nelineynykh sistem upravleniya na osnove kvazilineynykh modeley [Design of nonaffine nonlinear control systems based on quasilinear models], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye* [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye], 2025, 26(5), pp. 223-232. Available at: <https://doi.org/10.17587/mau.26.223-232>.
9. Karapeev A.N., Kosenko E.Yu., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh. Issledovaniye intellektual'nogo adaptivnogo algoritma upravleniya na baze metoda obucheniya s podkreplenіem [Study of an intelligent adaptive control algorithm based on the reinforcement learning method], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2025, No. 2, pp. 162-175.
10. Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., & Evdokimov I.D. Algoritm robastnogo upravleniya odnomernym dinamicheskim ob'ektom na osnove tablitsnogo Q-metoda obucheniya s podkreplenіem [Robust control algorithm for single input single output dynamic object based on table-based Q-method of reinforcement learning], *Informatika i avtomatizatsiya* [Informatics and Automation], 2025, 24 (3), pp. 717-744. Available at: <https://doi.org/10.15622/ia.24.3.1>.
11. Xu B., Yang C. and Shi Z. Reinforcement Learning Output Feedback NN Control Using Deterministic Learning Technique, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2014, Vol. 25 (3), pp. 635-641. DOI: 10.1109/TNNLS.2013.2292704.
12. Mu C., Ni Z., Sun C., and He H. Data-driven tracking control with adaptive dynamic programming for a class of continuous-time nonlinear systems, *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, Vol. 47 (6), pp. 1460-1470. DOI: 10.1109/TCYB.2016.2548941.
13. Wang A., Liao X., Dong T. Event-driven optimal control for uncertain nonlinear systems with external disturbance via adaptive dynamic programming, *Neurocomputing*, 2018, Vol. 281, pp. 188-195. DOI: 10.1016/j.neucom.2017.12.010.
14. Biao Luo, Yin Yang, Derong Liu, and Huai-Ning Wu. Event-Triggered Optimal Control with Performance Guarantees Using Adaptive Dynamic Programming, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2020, Vol. 31 (1), pp. 76-88. DOI: 10.1109/TNNLS.2019.2899594.
15. Yang X., Xu M. and Wei Q. Dynamic Event-Sampled Control of Interconnected Nonlinear Systems Using Reinforcement Learning, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2024, Vol. 35(1), pp. 923-937. DOI: 10.1109/TNNLS.2022.3178017.
16. Zhang H., Zhao X., Wang H., Zong G. and Xu N. Hierarchical Sliding-Mode Surface-Based Adaptive Actor-Critic Optimal Control for Switched Nonlinear Systems With Unknown Perturbation, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2024, Vol. 35 (2), pp. 1559-1571. DOI: 10.1109/TNNLS.2022.3183991.
17. Dong C., Chen L. and Dai S.-L. Performance-Guaranteed Adaptive Optimized Control of Intelligent Surface Vehicle Using Reinforcement Learning, *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2024, Vol. 9(2), pp. 3581-3592. DOI: 10.1109/TIV.2023.3338486.
18. Phuong Nam Dao, Minh Hiep Phung. Nonlinear robust integral based actor-critic reinforcement learning control for a perturbed three-wheeled mobile robot with mecanum wheels, *Computers and Electrical Engineering*, 2025, Vol. 121. 109870. DOI:10.1016/j.compeleceng.2024.109870.
19. Ding Wang, Xin P., Ren J., and Qiao J. Adaptive Critic Tracking Design for Data-Based Nonaffine Predictive Control, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, Vol. 21(4), pp. 5534-5545. DOI: 10.1109/TASE.2023.3313159.
20. Berkenkamp F., Turchetta M., Schoellig A., Krause A. Safe model-based reinforcement learning with stability guarantees, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017, Vol. 30, pp. 908-918. DOI: 10.48550/arXiv.1705.08551.
21. Han M., Zhang L., Wang J., Pan W. Actor-critic reinforcement learning for control with stability guarantee, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, Vol. 5 (4), pp. 6217-6224. DOI: 10.1109/LRA.2020.3011351.

22. Zhou Z., Liu A., and Wang D. Improved adaptive-critic-based dynamic event-triggered control for non-affine systems, *Mechatronics Tech.*, 2024, Vol. 1 (1). DOI: 10.55092/mt20230002.
23. Cheng R., Orosz G., Murray R.M., Burdick J.W. End-to end safe reinforcement learning through barrier functions for safety critical continuous control tasks, *The Thirty-Third AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2019, pp. 3387-3395.
24. Choi J., Castaneda F., Tomlin C.J., Sreenath K. Reinforcement learning for safety-critical control under model uncertainty, using control Lyapunov functions and control barrier functions, *Conference Robotics: Science and Systems*, 2020.
25. Xue W., Lian B., Fan J., Kolaric P., Cha T., Lewis F. Inverse Reinforcement Q-Learning Through Expert Imitation for Discrete-Time Systems, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2021, pp. 1-14. 10.1109/TNNLS.2021.3106635.
26. Yu Zhang, Niu B., Zhao X., Duan P., Wang H., and Gao B. Global Predefined-Time Adaptive Neural Network Control for Disturbed Pure-Feedback Nonlinear Systems with Zero Tracking Error, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2023, Vol. 34 (9), pp. 6328-6338.
27. Wang D., Zhou Z., Li M., Ren J., and Qia J. Event-based robust performance guarantee for nonaffine plants via system identification, *International Journal Robust Nonlinear Control*, 2023, Vol. 33, pp. 53650-5387. DOI: 10.1002/rnc.6646.
28. Zanon M. Gros S. Safe Reinforcement Learning Using Robust MPC, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, pp. 1-1. 10.1109/TAC.2020.3024161.
29. Rizvi S. A.A., Lin Z. Output Feedback Q-Learning Control for the Discrete-Time Linear Quadratic Regulator Problem, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2018, pp. 1-14. 10.1109/TNNLS.2018.2870075.
30. Kim J.W., Oh T.H., Son S.H., Jeong D.H., Lee J.M. Convergence analysis of the deep neural networks based globalized dual heuristic programming, *Automatica*, 2020, Vol. 122. DOI: 10.1016/j.automatica.2020.109222.
31. Borovik V.S., Shidlovskiy S.V. Obuchenie s podkrepleniem v sistemakh upravleniya ob'ektami s transportnym zapazdyvaniem [Reinforcement learning in plant control systems with transport lag], *Avtometriya [Autometry]*, 2021, Vol. 57 (3), pp. 48-57. DOI: 10.15372/AUT20210306.
32. Galyaev A.A., Medvedev A.I., Nasonov I.A. Neyrosetevoy algoritm perekhvata mashinoy Dubinsa tseley, dvizhushchikhsya po izvestnym traektoriyam [Neural network algorithm for intercepting targets moving along known trajectories by a Dubins' car], *Avtomatika i telemekhanika [Automation and Telemekhanics]*, 2023, No. 3, pp. 3-21. DOI: 10.31857/S0005231023030017.
33. Khapkin D.L., Feofilov S.V. Sintez ustoychivyykh neyrosetevykh regulyatorov dlya ob'ektov s ogranichitel'nyimi v usloviyakh nepolnoy informatsii [Synthesis of stable neural network controllers for objects with constraints under conditions of incomplete information], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie]*, 2024, Vol. 25 (7), pp. 345-353. Available at: <https://doi.org/10.17587/mau.25.345-353>.
34. Pshikhov V., Krukhmalev V., Medvedev M., and Neydorf R. Estimation of Energy Potential for Control of Feeder of Novel Cruiser/Feeder MAAT System, *SAE Technical Paper*, 2012, Vol. 2012-01-2099. doi: 10.4271/2012-01-2099.
35. Pshikhov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gayduk A.R., Neydorf R.A., Belyaev V.E., Fedorenko R.V., Kostyukov V.A., Krukhmalev V.A. Sistema pozitsionno-traektornogo upravleniya robotizirovannoy vozdukhoplavatel'noy platformoy: algoritmy upravleniya [Position-trajectory control system of a robotic aeronautical platform: control algorithms], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie]*, 2013, No. 7, pp. 13-20.
36. Gayduk A.R., Pshikhov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gistsov V.G. Nepreryvnoe upravlenie nelineynymi neaffinnymi ob'ektami [Continuous control of nonlinear non-affine objects], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2024, No. 1 (237), pp. 122-133.
37. Medvedev M.Yu., Pshikhov V.Kh., Medvedev I.M. Algoritmy adaptivnogo upravleniya kaskadnymi dinamicheskimi ob'ektami na baze metoda obucheniya s podkrepleniem [Algorithms for adaptive control of cascade dynamic objects based on the reinforcement learning method], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie]*, 2026, No. 3

Медведев Михаил Юрьевич – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: medvmihal@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; д.т.н.; ведущий научный сотрудник.

Пшихов 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.

Гайдук Анатолий Романович – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: gaiduk_2003@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; д.т.н.; профессор; ведущий научный сотрудник.

Медведев Илья Михайлович – Южный федеральный университет; e-mail: imedvede@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; студент.

Косенко Евгений Юрьевич – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: ekosenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; к.т.н.; старший научный сотрудник.

Medvedev Mikhail Yurjevich – R&D Institute of Robotics and Control Systems, Southern Federal University; e-mail: medvmihal@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634371694; dr. of eng. sc.; leading researcher.

Pshikhov Viacheslav Khasanovich – R&D Institute of Robotics and Control Systems, Southern Federal University; e-mail: pshichop@rambler.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634371694; dr. of eng. sc.; professor; director.

Gaiduk Anatoly Romanovich – R&D Institute of Robotics and Control Systems, Southern Federal University; e-mail: gaiduk_2003@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634371694; dr. of eng. sc.; professor; leading researcher.

Medvedev Ilya Mikhailovich – Southern Federal University; e-mail: imedvede@sfedu.ru; Taganrog, Russia; student.

Kosenko Evgeniy Yurjevich – R&D Institute of Robotics and Control Systems, Southern Federal University; e-mail: ekosenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634371694; cand. of eng. sc.; senior researcher.

УДК 004.896+629.58+001.891.57

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-201-212

В.С. Быкова, А.И. Машошин

**АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ НЕОБИТАЕМОМ ПОДВОДНЫМ
АППАРАТОМ ПРИ ПОИСКЕ НАЗНАЧЕННОГО ДОННОГО ОБЪЕКТА
ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ СРЕДСТВ
МОНИТОРИНГА ДНА**

Поиск назначенных донных объектов является одной из наиболее сложных задач, решаемых АНПА, что обусловлено рядом факторов, основными из которых являются: разнообразие объектов поиска (затонувшие подводные лодки, надводные корабли, самолёты, вертолёты, мины, подводные трубопроводы и кабели связи, различная подводная инфраструктура), необходимостью комплексного использования для поиска различных средств мониторинга дна, отличающихся физическими принципами функционирования, разрешающей способностью и поисковой производительностью. Целью работы, результаты которой приведены в статье, была разработка алгоритма управления АНПА при поиске назначенного донного объекта, удовлетворяющего этим требованиям, и его проверка с использованием цифрового полигона и цифрового двойника АНПА. В качестве критерия выбора средства мониторинга дна в каждом конкретном случае была принята вероятность правильного отнесения обнаруженного донного объекта к объекту поиска. В результате логика поиска назначенного донного объекта выглядит следующим образом. Осуществляется поиск донных объектов средством с максимальной производительностью поиска. При обнаружении донного объекта определяется вероятность его принадлежности объекту поиска. Если она больше заданного высокого порога, принимается решение об обнаружении назначенного донного объекта. Если же она меньше заданного низкого порога, принимается решение, что обнаружен посторонний объект. В остальных случаях принимается решение о необходимости обследования объекта средством с большей разрешающей способностью. Описана технология классификации донных объектов на основе обучения искусственной нейронной сети с использованием синтезированного обучающего материала. Приведены результаты проверки эффективности разработанного алгоритма с использованием цифрового полигона и цифрового двойника АНПА. Выполненное моделирование разработанного алгоритма показало, что комплексное использование средств мониторинга дна повышает вероятность успешного решения задачи и сокращает время её решения.

АНПА; система управления АНПА; поиск назначенных донных объектов; алгоритм классификации донных объектов; искусственная нейронная сеть; цифровой полигон; цифровой двойник.

V.S. Bykova, A.I. Mashoshin

AN ALGORITHM FOR CONTROLLING AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE WHEN SEARCHING FOR A DESIGNATED BOTTOM OBJECT WITH THE INTEGRATED USE OF VARIOUS BOTTOM MONITORING TOOLS

The search for designated bottom objects is one of the most difficult tasks solved by the AUV, due to a number of factors, the main of which are: the variety of search objects (sunken submarines, surface ships, airplanes, helicopters, mines, underwater pipelines and communication cables, various underwater infrastructure), the need for integrated use for search for various bottom monitoring tools that differ in their physical principles of operation, resolution, and search performance. The purpose of the work, the results of which are presented in the article, was to develop an algorithm for managing the AUV when searching for a designated bottom object that meets these requirements, and to verify it using a digital polygon and a digital twin of the AUV. The probability of correctly attributing the detected bottom object to the search object was chosen as a criterion for choosing a bottom monitoring tool in each specific case. As a result, the logic of searching for a designated bottom object is as follows. The search for bottom objects is carried out using a tool with maximum search performance. When a bottom object is detected, the probability of its belonging to the search object is determined. If it exceeds the set high threshold, a decision is made to locate the designated bottom object. If it is less than the specified low threshold, it is decided that an extraneous object has been detected. In other cases, a decision is made on the need to examine the object with a higher resolution. The technology of classification of bottom objects based on the training of an artificial neural network trained using synthesized training material is described. The results of checking the effectiveness of the developed algorithm using a digital polygon and a digital twin of AUV are presented. The simulation of the developed algorithm showed that the integrated use of bottom monitoring tools increases the likelihood of a successful solution to the problem and reduces the time needed to solve it.

AUV; AUV management system; search for assigned bottom objects; bottom object classification algorithm; artificial neural network; digital polygon; digital twin.

Введение. Поиск назначенных донных объектов является одной из наиболее сложных задач, решаемых АНПА, что обусловлено следующими факторами:

- ◆ перечень типов объектов поиска не ограничен. При этом объект поиска может находиться как на поверхности дна, так и под слоем ила;
- ◆ координаты объекта поиска могут быть указаны с большими ошибками, вплоть до размеров большого района;
- ◆ учитывая, что разные средства мониторинга дна, основанные на разных физических принципах, обладают разной разрешающей способностью и разной поисковой производительностью (причём, чем больше разрешающая способность, тем меньше поисковая производительность, равная произведению ширины обследуемой полосы дна на скорость движения АНПА), эффективное обнаружение назначенного донного объекта за ограниченное время возможно только при комплексном использовании нескольких средств мониторинга дна, обладающих разными разрешающими способностями и поисковыми производительностями. Ввиду этого для решения рассматриваемой задачи, как правило, применяются АНПА тяжёлого класса (ТК), поскольку только они способны нести широкий спектр средств мониторинга дна;
- ◆ отдельной проблемой является распознавание назначенного донного объекта среди множества предметов, лежащих на дне.

При этом необходимо особо акцентировать, что решаемая практическая задача заключается не в обнаружении любых объектов, лежащих на дне, а в нахождении именно назначенного объекта.

В качестве назначенных объектов поиска могут выступать:

- ◆ затонувшие подводные лодки, надводные корабли, суда различного водоизмещения, самолёты и вертолёты;
- ◆ подводные трубопроводы и кабели связи;
- ◆ мины;
- ◆ различная подводная инфраструктура.

Задача поиска назначенных донных объектов с применением АНПА состоит из двух взаимосвязанных задач:

- 1) управление поведением АНПА при поиске донных объектов;
- 2) классификация обнаруженных донных объектов.

В литературе этим задачам посвящено достаточное количество публикаций [1–14], но все же остается открытым вопрос эффективности решения поставленной задачи АНПА, которая оценивается двумя показателями – вероятностью обнаружения назначенного объекта и временем, за которое она достигается.

К алгоритму, отвечающему за решение этой задачи, предъявляются следующие требования: он должен так организовать поиск, чтобы объект был обнаружен с вероятностью, не менее заданной, за время, не превосходящее заданное.

Целью работы, результаты которой приведены в статье, была разработка алгоритма управления АНПА при поиске назначенного донного объекта, удовлетворяющего этим требованиям, и его проверка с использованием цифрового полигона и цифрового двойника АНПА.

1. Описание алгоритма поиска назначенного донного объекта. Современные АНПА тяжелого класса, как правило, оснащены пятью типами средств мониторинга дна: тремя гидроакустическими (многолучевой эхолот – МЛЭ, гидролокатор бокового обзора – ГБО и профилограф – ПФ) (рис. 1), электромагнитным искателем (ЭМИ) и телекамерой с прожектором (ТК).

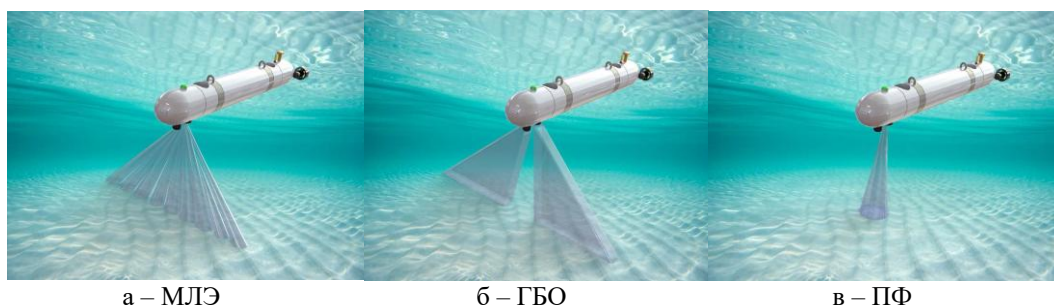


Рис. 1. АНПА обследуют дно гидроакустическими средствами мониторинга дна

Из перечисленных средств мониторинга дна наибольшую разрешающую способность имеет телекамера ТК. Однако для её использования АНПА должен двигаться на расстоянии от дна не более 5 м, обследуя полосу менее 10 м. Далее в сторону уменьшения разрешающей способности идёт ГБО, используемый на расстоянии до 100 м от дна. Он обследует полосу шириной 200 м. Наименьшей разрешающей способностью обладает МЛЭ, при использовании которого АНПА может двигаться на расстоянии до 200 м от дна, освещая полосу до 400 м.

При поиске затонувших объектов используется однолучевой либо многолучевой ПФ, который обследует полосу 20 м. Также при поиске затонувших объектов применяется ЭМИ, способный обнаруживать подводные кабели под напряжением и объекты, обладающие большой магнитной массой. ЭМИ обследует полосу до 30 м.

В известных публикациях, касающихся рассматриваемой задачи [15–18], не подвергается сомнению, что для эффективного поиска донных объектов должен применяться комплекс средств мониторинга дна, основанных на разных физических принципах. Вместе с тем, ряд принципиальных вопросов, связанных с поиском донных объектов, в публикациях остался без ответа. В частности:

- ♦ на основании каких критериев следует использовать то или иное средство мониторинга дна?
- ♦ каким образом осуществлять классификацию назначенных донных объектов?

Ввиду этого перед разработкой алгоритма поиска донных объектов была поставлена задача ответить на эти вопросы.

В первую очередь, потребовалось разработать алгоритм управления АНПА при поиске донных объектов, обеспечивающий компромисс между вероятностью обнаружения донного объекта и временем её достижения.

Для этого исследовалась связь между поисковой производительностью различных средств мониторинга дна и обеспечиваемой ими вероятностью правильной классификации различных типов объектов.

Поисковая производительность средства мониторинга дна равна произведению ширины обследуемой полосы дна на скорость АНПА. Но поскольку скорость АНПА обычно лежит в узких пределах 2-3 уз, то поисковая производительность фактически зависит только от ширины обследуемой полосы дна, которая, в свою очередь, зависит от расстояния от дна, на котором движется АНПА: чем больше это расстояние, тем шире обследуемая полоса. Но с ростом расстояния АНПА от дна уменьшается отношение сигнал/помеха и связанная с ним пространственная разрешающая способность на выходе приёмного тракта. Ввиду этого имеется определённый компромисс между расстоянием АНПА от дна и разрешающей способностью средства мониторинга дна.

В результате, чтобы гарантировать высокую вероятность обнаружения лежащего на дне назначенного донного объекта, нужно использовать ТК, но в этом случае обследование района, в котором предположительно находится объект поиска, может занять недопустимо продолжительное время. И наоборот, чтобы обследовать район за допустимое время, нужно использовать МЛЭ, но в этом случае нельзя гарантировать высокую вероятность обнаружения искомого донного объекта. Из этого напрашивается вывод о целесообразности комплексного использования разных средств мониторинга дна. Но для этого необходимо определить критерий, когда нужно использовать то либо другое средство.

После рассмотрения различных вариантов в качестве такого критерия была выбрана вероятность правильного отнесения обнаруженного донного объекта к объекту поиска. В результате логика поиска назначенного донного объекта выглядит следующим образом. Осуществляется поиск донных объектов средством с максимальной производительностью поиска. При обнаружении донного объекта определяется вероятность его принадлежности объекту поиска. Если она больше заданного высокого порога, принимается решение об обнаружении назначенного донного объекта. Если же она меньше заданного низкого порога, принимается решение, что обнаружен посторонний объект. В противном случае принимается решение о необходимости обследования объекта средством с большей разрешающей способностью.

Проблемным в описанной логике является способ определения вероятности принадлежности обнаруженного объекта объекту поиска по данным каждого средства мониторинга дна. Решение этой проблемы приведено в следующем разделе.

С учётом этой логики алгоритм поиска выглядит следующим образом.

1) По прибытии АНПА в район поиска программный комплекс управления (ПКУ) АНПА даёт команду включить МЛЭ и начать движение АНПА по заданной в маршрутном задании траектории на расстоянии от дна $H_{МЛЭ}$ и скорости движения, оптимальными при использовании МЛЭ.

2) В процессе движения МЛЭ периодически излучает зондирующие сигналы, принимает и обрабатывает эхосигналы, отражённые от дна. В результате формируется многопиксельное изображение текущего участка дна. Полученное изображение участка дна подаётся на вход обученной нейронной сети, которая вычисляет вероятность того, что на рассматриваемом участке дна находится назначенный объект.

3) Если эта вероятность оказалась меньше заданного в маршрутном задании низкого порогового значения, принимается решение, что назначенный объект на данном участке дна отсутствует и поиск назначенного объекта продолжается.

4) Если же эта вероятность превысила заданный в маршрутном задании высокий порог, принимается решение об обнаружении назначенного донного объекта, определяются его координаты и на этом поиск прекращается.

5) Если же значение вероятности оказалось между низким и высоким порогами, принимается решение о необходимости классификации участка дна средством мониторинга дна с более высокой разрешающей способностью, т.е. ГБО.

6) В этом случае выключается МЛЭ, включается ГБО, АНПА погружается на расстояние от дна $H_{ГБО}$, оптимального для использования ГБО, и один либо несколько раз проходит над тем же участком дна. По данным ГБО формируется изображение участка дна. Далее, как и при использовании МЛЭ, осуществляется его классификация с использованием искусственной нейронной сети. В результате классификации определяется вероятность того, что обнаружен назначенный объект.

7) Если эта вероятность оказалась меньше заданного в маршрутном задании низкого порога, принимается решение, что назначенный объект на данном участке дна отсутствует и поиск назначенного объекта продолжается.

8) Если эта вероятность превысила заданный в маршрутном задании высокий порог, принимается решение об обнаружении назначенного донного объекта, определяются его координаты и на этом поиск прекращается.

9) Если значение вероятности оказалось между низким и высоким порогами, принимается решение о необходимости классификации обнаруженного объекта средством мониторинга дна с более высокой разрешающей способностью, т.е. ТК. В этом случае выключается ГБО и включается ТК, АНПА погружается на расстояние от дна, необходимое для классификации объекта с использованием ТК и обходит участок дна по кругу. В процессе обхода формируется изображение участка дна. Далее осуществляется классификация участка дна с использованием искусственной нейронной сети. В результате классификации определяется вероятность того, что обнаружен назначенный объект.

10) Если эта вероятность оказалась меньше заданного в маршрутном задании низкого порога, принимается решение, что объект посторонний и поиск назначенного объекта продолжается с использованием МЛЭ.

11) Если же эта вероятность превысила заданный в маршрутном задании высокий порог, принимается решение об обнаружении назначенного донного объекта, определяются координаты обнаруженного объекта и на этом поиск прекращается.

12) Если же вероятность оказалась между низким и высоким порогами и при этом для классификации объекта были задействованы все средства мониторинга дна, имеющиеся на АНПА, принимается решение об обнаружении неизвестного объекта, при этом изображения объекта, полученные с использованием каждого из средств мониторинга дна, вместе с координатами объекта записываются в архиватор АНПА для уточнения классификации на берегу. Затем поиск назначенного донного объекта продолжается с использованием МЛЭ.

2. Описание алгоритма классификации обнаруженного донного объекта. Наиболее перспективной технологией распознавания объектов, развиваемой в настоящее время, является технология глубокого обучения искусственных нейронных сетей (ИНС). Однако для её эффективного применения требуется наличие большого объёма обучающего материала, исчисляемого тысячами и более экземпляров, что для рассматриваемой задачи поиска донных объектов практически не реализуемо.

Ввиду этого была рассмотрена возможность применения других технологий, в частности технологии создания эвристических алгоритмов, описанных во многих публикациях [14, 16, 18]. В результате анализа этих публикаций был сделан вывод, что на сегодняшний день отсутствуют методы, позволяющие распознавать донные объекты с высокой достоверностью, а также оценивать вероятность правильной классификации в каждом конкретном случае. Ввиду этого был сделан вывод, что целесообразно сосредоточиться на приспособлении к рассматриваемой задаче технологии глубокого обучения ИНС. Очевидным направлением этого приспособления является разработка метода синтеза обучающей выборки.

В работе такой метод был разработан [19, 20]. Он заключается в следующем:

1) До начала выполнения миссии на основании маршрутного задания формируется исходное описание объекта поиска, включающее его геометрические размеры, положение на дне, материал корпуса, наличие электромагнитных излучений.

2) Аналогично формируются исходные описания до десяти характерных альтернативных объектов, которые могут быть обнаружены на дне.

3) С использованием исходного описания формируются цифровые 3D модели объекта поиска и альтернативных объектов.

4) Цифровая 3D модель объекта поиска и цифровые модели альтернативных объектов с использованием цифровых двойников средств мониторинга дна [21] преобразуется в цифровые изображения на выходе каждого из средства мониторинга дна. При этом следует заметить, что выходом большинства средств мониторинга дна являются многопиксельные изображения, включающие как сам объект, так и участок дна. Данный процесс повторяется многократно в интересах получения множества изображений распознаваемого объекта с разных ракурсов наблюдения.

5) Для дальнейшего увеличения объёма обучающего материала полученные цифровые изображения объекта поиска и альтернативных объектов подвергаются известной процедуре аугментации, позволяющей изменить масштаб и поворот изображения, а также зашумить его.

6) С использованием, как минимум, нескольких сотен изображений объекта поиска и альтернативных объектов осуществляется обучение предобученной для решения подобных задач выбранной свёрточной ИНС применительно к каждому средству мониторинга дна. Результатом обучения выбранной ИНС являются как настроечные коэффициенты, используемые для распознавания донного объекта соответствующим средством мониторинга дна, так и вероятности правильного отнесения объекта поиска и каждого альтернативного донного объекта к своему классу.

7) Результаты обучения ИНС применительно к каждому средству мониторинга дна записываются в память процессора АНПА.

8) Классификация обнаруженного донного объекта по данным конкретного средства мониторинга дна осуществляется путём подачи на вход ИНС, настроенной применительно к этому средству, изображения объекта на выходе этого средства. На выходе ИНС появляются вероятности принадлежности распознаваемого объекта как объекту поиска, так и каждому альтернативному объекту, что позволяет по формуле Байеса вычислить апостериорную вероятность того, что распознаваемый объект является объектом поиска.

Для проверки работоспособности описанной технологии была промоделирована задача распознавания затонувшего самолёта по данным ГБО. В качестве альтернативных объектов рассматривались трубопровод, небольшое затонувшее судно и мина.

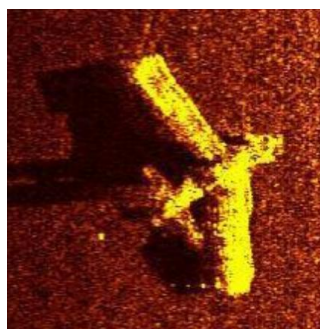
В качестве ИНС с глубоким обучением была выбрана ИНС SqueezeNet [22]. Выбор именно этой сети был обусловлен её возможностью проводить обучение с наименьшими затратами вычислительной мощности. SqueezeNet является свёрточной нейронной сетью, содержащей 18 скрытых слоев (слоёв обучения). Эта нейронная сеть настроена на классификацию изображения 1000 категорий объектов и была проверена на базе данных ImageNet, где показала высокий уровень классификации изображений. Для применения SqueezeNet к рассматриваемой задаче проводилось её обучение с использованием изображений, синтезированных по описанной методике. Для обучения настраивались параметры ИНС (скорость обучения, количество эпох обучения, функция оптимизации обучения и т.д.) таким образом, чтобы ошибка ИНС имела постепенно убывающее значение. Процесс обучения ИНС схематически показан на рис. 2.

В результате описанной процедуры синтеза обучающей выборки было сформировано 1800 изображений (по 450 изображений каждого класса объектов) размером 227x227 пикселей, из которых 1200 изображений (по 300 каждого класса) были обучающими и 600 (по 150 каждого класса) – контрольными.

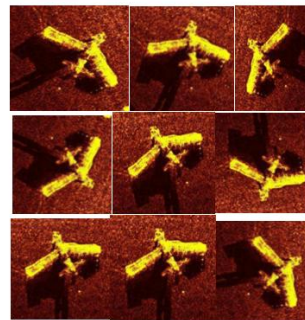
На рис. 3,а в качестве иллюстрации приведено полученное с использованием ГБО изображение лежащего на дне самолёта, скаченное из сети Интернет, а на рис. 3,б – результат его аугментации.



Рис. 2. Схема процесса обучения ИНС



а – Исходное изображение



б – Варианты аугментированных изображений

Рис. 3. Примеры аугментации изображения объекта типа «самолет»

Процесс обучения ИНС представлен на рис. 4, на котором по оси абсцисс отложены номера циклов (эпох) обучения, а по оси ординат: вероятность (в процентах) правильного распознавания. Из рассмотрения рис. 4 следует, что обучение ИНС достаточно быстро сходится к стопроцентной вероятности распознавания на обучающей выборке.

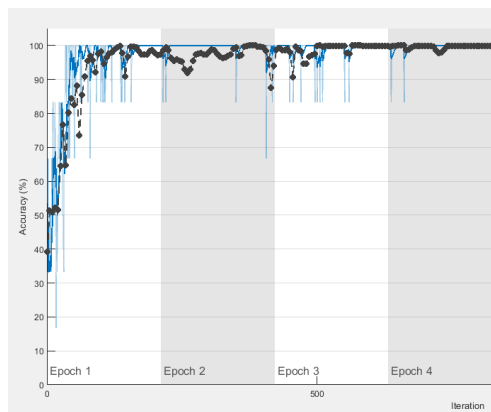


Рис. 4. Процесс обучения ИНС

Проверка обученной ИНС показала следующие результаты:

- ♦ вероятность правильного распознавания объектов типа "самолёт": 94% на обучающей выборке и 86% на контрольной выборке;
- ♦ вероятность ложной тревоги (т.е. отнесение объектов альтернативных классов к классу типа "самолёт"): 9% на обучающей выборке и 17% на контрольной выборке.

3. Моделирование алгоритма поиска назначенного донного объекта. Проверка эффективности алгоритма поиска назначенного донного объекта проводилась путём моделирования выполнения миссии АНПА на цифровом полигоне с использованием цифрового двойника АНПА [23]. Структура взаимодействия цифрового полигона (блоки, окрашенные голубым цветом) и цифрового двойника АНПА (блоки, окрашенные жёлтым цветом) изображена на рис. 5.

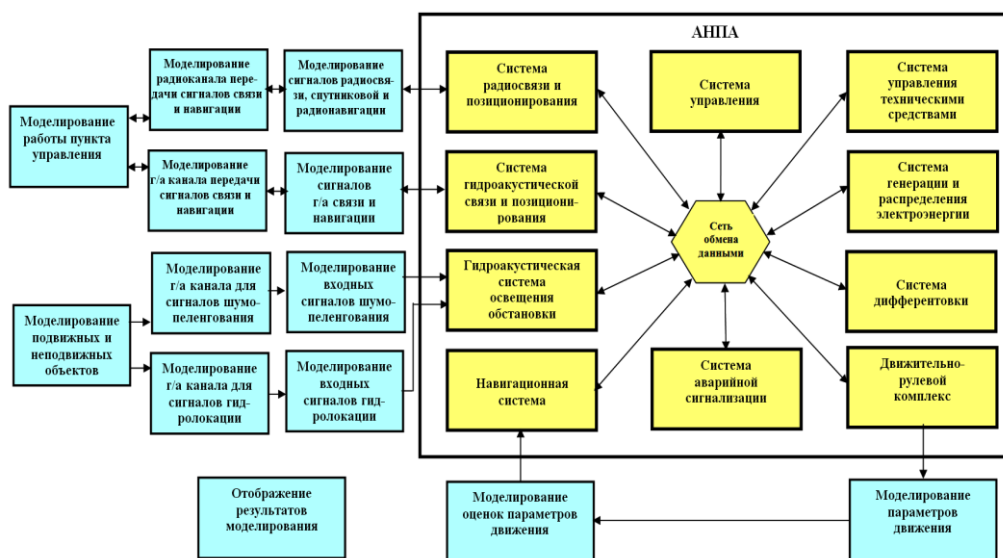


Рис. 5. Структура взаимодействия цифрового полигона и цифрового двойника АНПА при отработке алгоритмов управления АНПА

При отработке задачи поиска донных объектов цифровой полигон имитирует:

- ♦ географические и гидроакустические условия в районе миссии АНПА;
- ♦ структуру дна;
- ♦ различные донные объекты;
- ♦ входные сигналы средств мониторинга дна;
- ♦ входные сигналы навигационных датчиков измерения курса, скорости, глубины АНПА и глубины под килём.

При отработке задачи поиска донных объектов задействованы цифровые двойники следующих систем АНПА:

- ♦ системы управления АНПА, в которой реализован описанный выше алгоритм управления АНПА при поиске донных объектов с классификацией обнаруженных донных объектов с применением нейронной сети архитектуры SqueezeNet;
- ♦ системы управления техническими средствами;
- ♦ навигационной системы;
- ♦ гидроакустической системы освещения обстановки, включающей средства мониторинга дна;
- ♦ системы радиосвязи.

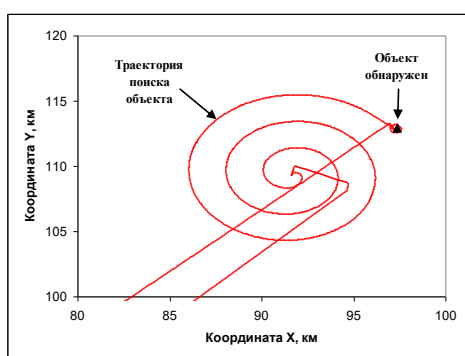
Моделировалась следующая миссия АНПА. Перед АНПА была поставлена задача найти потерпевший крушение легкомоторный самолёт. Район крушения был известен. АНПА должен был прибыть в центр района поиска, погрузиться на заданную глубину и

начать движение по раскручивающейся спирали, реализовывая описанный выше алгоритм поиска. При обнаружении самолёта АНПА должен всплыть, определить точные координаты места крушения и по радиоканалу сообщить их на пункт управления.

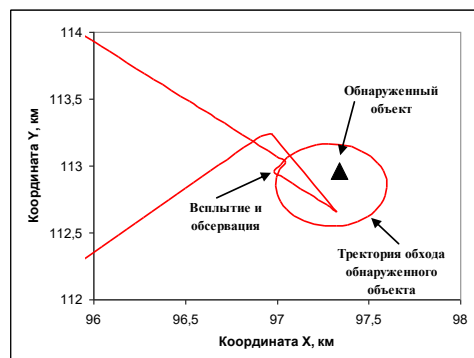
Учитывая, что объект поиска является достаточно крупногабаритным, для поиска применяются МЛЭ и ГБО. Применять ТК нет необходимости. Поиск начинается с использованием МЛЭ. При обнаружении донного объекта осуществляется его классификация с определением вероятности принадлежности объекта классу самолёт. В зависимости от этой вероятности согласно описанному выше алгоритму принимается одно из трёх решений: считать самолёт обнаруженным и прекратить поиск; считать объект посторонним и продолжить поиск; уточнить классификацию с использованием ГБО. Если в течение 48 часов объект поиска не обнаружен, миссия считается unsuccessful. В противном случае миссия признаётся успешной и определяется время обнаружения объекта с момента начала поиска.

Моделирование поиска повторялось 1000 раз. По результатам всех повторов определялся процент успешных миссий и среднее время обнаружения объекта поиска для успешных миссий.

На рис. 6 в качестве иллюстрации приведено маневрирование АНПА при поиске назначенного донного объекта. Рис. 6,а демонстрирует движение АНПА по раскручивающейся спирали при поиске донного объекта с использованием МЛЭ. На рис. 6,б изображён манёвр обхода объекта для уточнения классификации.



а – процесс поиска донного объекта



б – обход обнаруженного объекта для уточнения его классификации

Рис. 6. Иллюстрация маневрирования АНПА в процессе поиска назначенного донного объекта в форме штурманской прокладки, выполняемой системой навигации АНПА

Для сравнения по описанной методике моделировались 3 типа миссий в зависимости от использованных средств мониторинга дна: 1) МЛЭ и ГБО; 2) только МЛЭ и 3) только ГБО.

Результаты моделирования приведены в табл. 1.

Используемые средства мониторинга дна	Процент успешных миссий	Среднее время обнаружения объекта поиска, час
МЛЭ и ГБО	97	31,7
Только МЛЭ	84	27,2
Только ГБО	71	44,3

Из рассмотрения табл. 1 следует, что поиск назначенного донного объекта при использовании МЛЭ и ГБО выигрывает по проценту успешных миссий. Поиск с использованием только МЛЭ позволяет ускорить обнаружение объекта поиска, но приводит к существенному сокращению количества успешных миссий. При использовании только ГБО АНПА в 29% случаев не успевает в течение 48 часов обнаружить искомый объект. При этом возрастает и среднее время его обнаружения в миссиях, когда объект найти удалось.

Заключение. В статье излагается алгоритм применения АНПА для поиска назначенного донного объекта с использованием комплекса средств мониторинга дна, отличающихся разрешающей способностью и поисковой производительностью. Описана технология классификации донных объектов на основе обучения искусственной нейронной сети с использованием синтезированного обучающего материала. Приведена технология отработки разработанного алгоритма с использованием цифрового полигона и цифрового двойника АНПА. Выполненное моделирование разработанного алгоритма показало, что комплексное использование средств мониторинга дна повышает вероятность успешного решения задачи и сокращает время её решения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №25-29-01261).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фирсов Ю.Г.* Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров. – СПб.: Нестор-История, 2010. – 348 с.
2. *Киселев Л.В., Костенко В.В., Медведев А.В.* Управление движением и динамика гибридного подводного аппарата при патрулировании морских акваторий по эквидистантным траекториям в сложном рельефе дна // Подводные исследования и робототехника. – 2021. – № 3 (37). – С. 46-56.
3. *Мартынова Л.А.* Метод согласованного поведения излучателя и автономных необитаемых подводных аппаратов для эффективного ведения сейсморазведки // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 1 (86). – С. 83-92.
4. *Shaukat M.S., K. Yannik, Bader S., Kirste T.* Towards Training-Free Underwater 3D Object Detection from Sonar Point Clouds: A Comparison of Traditional and Deep Learning Approaches // arXiv preprint arXiv:2508.18293v1 [cs.CV]. 2025. 22 Aug. – URL: <https://arxiv.org/abs/2508.18293> (дата обращения: 25.02.2026).
5. *Williams D.P.* The Mondrian Detection Algorithm for Sonar Imagery // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2018. – Vol. 56, No. 2. – P. 1091-1102. – DOI: 10.1109/TGRS.2017.2758808.
6. *Gerg I.D., Williams D.P.* Additional Representations for Improving Synthetic Aperture Sonar Classification Using Convolutional Neural Networks // arXiv preprint arXiv:1808.02868. – 2018. – DOI: 10.48550/arXiv.1808.02868.
7. *Римский-Корсаков Н.А.* Определение координат подводных природных объектов методом гидролокации бокового обзора // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 12-1. – С. 148-153.
8. *Безрук Г.Г., Мартынова Л.А., Саенко И.Б.* Динамический метод поиска антропогенных объектов в морском дне с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // Тр. СПИИРАН. – 2018. – Вып. 3 (58). – С. 203-226.
9. *Киселев Л.В., Медведев А.В.* Траекторное обследование границ морских акваторий группой автономных необитаемых подводных роботов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 5 (247). – С. 185-197.
10. *Артюхин В.В., Вялишев А.И., Добров В.М., Любин Ю.Н.* Метод автоматической классификации подводных потенциально опасных объектов // Технологии гражданской безопасности. – 2019. – Т. 16, № 1 (59). – С. 12-19.
11. *Тарасов С.П., Воскресенский А.В., Пивнев П.П., Воронин В.А.* Возможности нелинейной гидроакустики в вопросах поиска малоразмерных объектов средствами робототехники // Матер. XVI Всероссийской научно-практической конференции и XII молодежной школы-семинара. – Ростов-на-Дону, 2021. – С. 81-85.
12. *Nambiar K.V.A., George A., Mathew A., Sreehari R., Deepak S.* Object Detection and Classification from Sonar Underwater Images Using YOLO and DETR Models // 2025 International Conference on Advanced Processing and Computational Intelligence (APCI). – 2025. – DOI: 10.1109/APCI65531.2025.11136948.
13. *Qiao J., Yu J., Huang Y., Feng H., Jia D., Wang Z., Wang B.* AUVs for Seabed Surveying: A Comprehensive Review of Side-Scan Sonar-Based Target Detection // Journal of Marine Science and Engineering. – 2026. – Vol. 14, No. 2.
14. *Бахмутов В.Ю., Жуков Ю.Н.* Автоматизированный метод обнаружения объектов на морском дне по данным многолучевых гидролокаторов // Навигация и гидрография. – 2019. – № 57. – С. 58-66.
15. *Phung A., Billings G., Camilli R.* Sonar-Aided Manipulation in Low-Visibility Conditions by Novice Users // OCEANS 2024 – Halifax: Conference Proceedings. – IEEE, 2024. – DOI: 10.1109/OCEANS55160.2024.10753694.

16. Боровик А.И. Технология использования АНПА для исследования подводных потенциально опасных объектов в Карском море // Подводные исследования и робототехника. – 2022. – № 1 (39). – С. 32-40. – DOI: 10.37102/1992-4429.2022.39.1.03.
17. Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В., Степанов А.В. Оценка сходимости глубин при площадной съемке рельефа дна многолучевым эхолотом и интерферометрическим гидролокатором бокового обзора // Журнал радиоэлектроники. – 2017. – № 4. – ISSN 1684-1719.
18. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / отв. ред. Л.В. Киселев. – Владивосток: Дальнаука, 2018. – 368 с.
19. Патент РФ № 2818184 с приоритетом от 03.11.2022 по заявке № 2022128572. Способ распознавания назначенного донного объекта / Быкова В.С., Машошин А.И., Смирнов А.С. Опубл. 25.04.24, бюлл. № 12.
20. Bykova V.S, Mashoshin A.I., Smirnov A.S. One approach to the recognition of bottom objects using monitoring systems installed on an autonomous underwater vehicle // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2022, Sochi. – <https://ieeexplore.ieee.org/document/9896324>.
21. Павлов А.А., Быкова В.С. Имитационная модель средств обследования дна с использованием средств OpenGL // Тр. седьмой международной научно-практической конференции «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2023). – СПб., 2023. – С. 169-175.
22. Iandola F.N., Han S., Moskewicz M.W., Ashraf K., Dally W.J., Keutzer K. SqueezeNet: AlexNet-level Accuracy with 50x Fewer Parameters and <0.5 MB Model Size // arXiv preprint arXiv:1602.07360. – 2016.
23. Быкова В.С., Машошин А.И. Цифровой полигон для отработки системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Морская радиоэлектроника. – 2023. – № 2 (84). – С. 58-64.

REFERENCES

1. Firsov Yu.G. Osnovy gidroakustiki i ispol'zovaniya gidrograficheskikh sonarov [Fundamentals of hydroacoustics and the use of hydrographic sonars]. Saint Petersburg: Nestor-Istoriya, 2010, 348 p.
2. Kiselev L.V., Kostenko V.V., Medvedev A.V. Upravlenie dvizheniem i dinamika gibridnogo podvodnogo apparata pri patrulirovanii morskikh akvatoriy po ekvidistantnym traektoriyam v slozhnom rel'efe dna [Motion control and dynamics of a hybrid underwater vehicle during patrol of marine areas along equidistant trajectories in complex bottom relief], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Research and Robotics], 2021, No. 3 (37), pp. 46-56.
3. Martynova L.A. Metod soglasovannogo povedeniya izluchatelya i avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov dlya effektivnogo vedeniya seysmorazvedki [Method of coordinated behavior of the emitter and autonomous unmanned underwater vehicles for efficient seismic exploration], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, No. 1 (86), pp. 83-92.
4. Shaikat M.S., Yannik, Bader S., Kirste T. Towards Training-Free Underwater 3D Object Detection from Sonar Point Clouds: A Comparison of Traditional and Deep Learning Approaches, *arXiv preprint arXiv:2508.18293v1 [cs.CV]*. 2025. 22 Aug. Available at: <https://arxiv.org/abs/2508.18293> (accessed 25 February 2026).
5. Williams D.P. The Mondrian Detection Algorithm for Sonar Imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, Vol. 56, No. 2, pp. 1091-1102. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2758808.
6. Gerg I.D., Williams D.P. Additional Representations for Improving Synthetic Aperture Sonar Classification Using Convolutional Neural Networks, *arXiv preprint arXiv:1808.02868*, 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1808.02868.
7. Rimskiy-Korsakov N.A. Opredelenie koordinat podvodnykh prirodnykh ob"ektov metodom gidrolokatsii bokovogo obzora [Determination of coordinates of underwater natural objects by side-scan sonar method], *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2017, No. 12-1, pp. 148-153.
8. Bezruk G.G., Martynova L.A., Saenko I.B. Dinamicheskii metod poiska antropogennykh ob"ektov v morskome dne s ispol'zovaniem avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Dynamic method for searching anthropogenic objects in the seabed using autonomous unmanned underwater vehicles], *Tr. SPIIRAN* [Proceedings of SPIIRAS], 2018, Issue 3 (58), pp. 203-226.
9. Kiselev L.V., Medvedev A.V. Traektornoe obsledovanie granits morskikh akvatoriy gruppoy avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh robotov [Trajectory survey of marine area boundaries by a group of autonomous unmanned underwater robots], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 5 (247), pp. 185-197.
10. Artyukhin V.V., Vyalyshev A.I., Dobrov V.M., Lyubin Yu.N. Metod avtomaticheskoy klassifikatsii podvodnykh potentsial'no opasnykh ob"ektov [Method of automatic classification of underwater potentially hazardous objects], *Tekhnologii grazhdanskoй bezopasnosti* [Civil Security Technologies], 2019, Vol. 16, No. 1 (59), pp. 12-19.

11. Tarasov S.P., Voskresenskiy A.V., Pivnev P.P., Voronin V.A. Vozmozhnosti nelineynoy gidroakustiki v voprosakh poiska malorazmernykh ob"ektov sredstvami robototekhniki [Capabilities of nonlinear hydroacoustics in the search for small-sized objects using robotics], *Mater. XVI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XII molodezhnoy shkoly-seminara* [Proceedings of the XVI All-Russian Scientific and Practical Conference and XII Youth School-Seminar]. Rostov-on-Don, 2021, pp. 81-85.
12. Nambiar K.V.A., George A., Mathew A., Sreehari R., Deepak S. Object Detection and Classification from Sonar Underwater Images Using YOLO and DETR Models, *2025 International Conference on Advanced Processing and Computational Intelligence (APCI)*, 2025. DOI: 10.1109/APCI65531.2025.11136948.
13. Qiao J., Yu J., Huang Y., Feng H., Jia D., Wang Z., Wang B. AUVs for Seabed Surveying: A Comprehensive Review of Side-Scan Sonar-Based Target Detection, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2026, Vol. 14, No. 2.
14. Bakhmutov V.Yu., Zhukov Yu.N. Avtomatizirovanny metod obnaruzheniya ob"ektov na morskoy dne po dannym mnogoluchevykh gidrolokatorov [Automated method for detecting objects on the seabed based on multibeam sonar data], *Navigatsiya i gidrografiya* [Navigation and Hydrography], 2019, No. 57, pp. 58-66.
15. Phung A., Billings G., Camilli R. Sonar-Aided Manipulation in Low-Visibility Conditions by Novice Users, *OCEANS 2024 – Halifax: Conference Proceedings*. IEEE, 2024. DOI: 10.1109/OCEANS55160.2024.10753694.
16. Borovik A.I. Tekhnologiya ispol'zovaniya ANPA dlya issledovaniya podvodnykh potentsial'no opasnykh ob"ektov v Karskom more [Technology of using AUVs for research of underwater potentially hazardous objects in the Kara sea], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Research and Robotics], 2022, No. 1 (39), pp. 32-40. DOI: 10.37102/1992-4429.2022.39.1.03.
17. Krivtsov A.P., Smol'yaninov I.V., Elbakidze A.V., Stepanov A.V. Otsenka skhodimosti glubin pri ploshchadnoy s"emke rel'efa dna mnogoluchevym ekholotom i interferometricheskimi gidrolokatorami bokovogo obzora [Estimation of depth convergence during area survey of bottom relief using multibeam echosounder and interferometric side-scan sonar], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2017, No. 4. ISSN 1684-1719.
18. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы: sistemy, tekhnologii, primeneniye [Underwater robotic complexes: systems, technologies, applications], ed. by L.V. Kiselev. Vladivostok: Dal'nauka, 2018, 368 p.
19. Bykova V.S., Mashoshin A.I., Smirnov A.S. Patent RF № 2818184 s prioriteto ot 03.11.2022 po zayavke № 2022128572. Sposob raspoznavaniya naznachennogo donnogo ob"ekta [Russian Federation Patent No. 2818184 with priority dated 03.11.2022 for application No. 2022128572. Method for recognizing a designated bottom object]; published April 25 2024; bull. No. 12.
20. Bykova V.S., Mashoshin A.I., Smirnov A.S. One approach to the recognition of bottom objects using monitoring systems installed on an autonomous underwater vehicle, *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2022, Sochi. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9896324>.
21. Pavlov A.A., Bykova V.S. Imitatsionnaya model' sredstv obsledovaniya dna s ispol'zovaniem sredstv OpenGL [Simulation model of seabed survey tools using OpenGL] *Tr. sed'moy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Imitatsionnoe i kompleksnoe modelirovaniye morskoy tekhniki i morskikh transportnykh sistem» (IKM MTMTS-2023)* [Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference "Imitative and Complex Modeling of Marine Equipment and Marine Transport Systems" (ICM MMTS-2023)]. St. Petersburg, 2023, pp. 169-175.
22. Iandola F.N., Han S., Moskewicz M.W., Ashraf K., Dally W.J., Keutzer K. SqueezeNet: AlexNet-level Accuracy with 50x Fewer Parameters and <0.5 MB Model Size, *arXiv preprint arXiv:1602.07360*, 2016.
23. Bykova V.S., Mashoshin A.I. Tsifrovoy poligon dlya otrabotki sistemy upravleniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Digital proving ground for testing the control system of an autonomous unmanned underwater vehicle], *Morskaya radioelektronika* [Marine Radio Electronics], 2023, No. 2 (84), pp. 58-64.

Быкова Валентина Сергеевна – АО "Концерн "ЦНИИ "Электронприбор"; e-mail: vs.bykova@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79213502293.

Машошин Андрей Иванович – АО "Концерн "ЦНИИ "Электронприбор"; e-mail: aimashoshin@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79217632345; д.т.н.; профессор.

Bykova Valentina Sergeevna – JSC «Concern «Elektroprigor»; e-mail: zvs2011@yandex.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79213502293.

Mashoshin Andrey Ivanovich – JSC «Concern «Elektroprigor»; e-mail: aimashoshin@mail.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79217632345; dr. of eng. sc.; professor.

Раздел III. Связь, навигация и наведение

УДК 621.396

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-213-221

Н.В. Колесов, А.М. Грузликов, Ю.М. Скородумов, В.С. Тюльников

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ МНОГОПУТЕВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ СООБЩЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХМЕРНЫХ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ СЕТЕЙ АНПА

Рассматривается класс телекоммуникационных сетей с подвижными узлами, важным подклассом которых являются так называемые географические сети. Их отличительная особенность состоит в доступности для каждого узла сети информации о географических координатах всех узлов, благодаря чему каждый узел знает полную топологию графа сети, что позволяет оперативно находить нужное число маршрутов передачи информации между любыми двумя узлами. Целью настоящей статьи является исследование алгоритмов многопутевой маршрутизации, для чего предлагается метод автоматического синтеза адекватных тестовых моделей сетей практически неограниченной сложности. В основе предлагаемого решения лежит композиционный подход, при котором сначала формируется относительно простой фрагмент сети, удовлетворяющий заданным ограничениям, после чего итоговая модель выстраивается как композиция копий такого фрагмента. Для исследования эффективности алгоритмов многопутевой маршрутизации предложен композиционный метод случайного синтеза тестовых моделей сложных сетей, удовлетворяющих ограничениям на межвершинные расстояния. Данный метод был применен к исследованию двух алгоритмов маршрутизации, в результате чего был получен большой массив показательных модельных данных. Полученные результаты, представленные в виде графиков, демонстрируют рост выигрыша во времени передачи сообщений по мере увеличения длины очереди в целевом потоке. Установлено, что эффективность многопутевой маршрутизации незначительна в условиях малой загруженности сети, однако ее полезность возрастает с ростом загруженности сети. Аналогичный уровень роста эффективности демонстрируется при переходе от алгоритма, не допускающего пересечения используемых путей, к алгоритму, допускающему такие пересечения.

Телекоммуникационная сеть; многопутевая маршрутизация; кратчайший путь; графовые модели.

N.V. Kolesov, A.M. Gruzlikov, Yu.M. Skorodumov, V.S. Tiulnikov

INVESTIGATING MULTIPATH MESSAGE ROUTING ALGORITHMS THROUGH THREE-DIMENSIONAL GRAPH MODELS OF AUV NETWORKS

This paper examines a class of telecommunication networks with mobile nodes, an important subclass within which is the so-called geography-aware networks. Their distinguishing feature is the availability of information about the geographic coordinates of all nodes in the network to each individual node, whereby each node is aware of the complete topology of the network graph, which enables rapid identification of the required number of information transmission routes between any two nodes. The purpose of this article is to investigate multipath routing algorithms. To this end, we propose a method for the automatic synthesis of adequate test models capable of representing networks of virtually unlimited complexity. The proposed solution is based on a compositional approach, in which a relatively simple network fragment that satisfies given constraints is first formed, and then the resulting model is constructed as a composition of copies of this fragment. To investigate the efficiency of multipath routing algorithms, we propose a compositional method for the random synthesis of test models of complex networks that satisfy constraints on distances between the vertices. This method was applied to the investigation of two routing algorithms, resulting in a large body of illustrative model data. The obtained results, presented in the form of graphs, demonstrate an increase in the gain in message transmission time as the queue length in the

target flow grows. While the efficiency of multipath routing is insignificant under low network load conditions, its usefulness increases with growing network load. A similar increase in efficiency is demonstrated when transitioning from an algorithm that does not allow intersecting paths to an algorithm that allows such intersections.

Telecommunication network; multipath routing; shortest path; graph models.

Введение. Телекоммуникационные сети занимают важное место в современном мире. Сети могут быть образованы как подводными, так и надводными, а также воздушными аппаратами [1–4]. Ниже рассматривается класс географических сетей автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). Их отличительная особенность состоит в доступности для каждого аппарата сети знания географических координат всех остальных аппаратов и, как следствие, знания графа сети. Это происходит за счет оперативного обмена значениями координат в предположении их неизменности за время обмена. Важным этапом проектирования сетей является разработка алгоритма маршрутизации сообщений, а именно, проблема поиска маршрутов для их скорейшей доставки. Казалось бы, этот вопрос в географических сетях может быть решен с привлечением известного алгоритма Дейкстры для поиска кратчайших путей в графе [5]. Однако на практике сети могут достигать весьма значительных размеров, когда передача всех сообщений по одному маршруту оказывается неэффективной, и возникает необходимость в многопутевой маршрутизации [6–14]. В этом случае для каждого сообщения строится более одного маршрута на случай, если основной маршрут будет перегружен, или он будет нарушен в результате отказа, или возникнет необходимость в существенном увеличении скорости доставки сообщений за счет перехода к параллельному процессу. Решение этой задачи рассмотрено в различных постановках. Некоторые решения предполагают использование полностью непересекающихся путей [8], другие напротив допускают их пересечения [9]. Также известны решения, обладающие способностью варьирования задержкой в передаче [10], свойствами адаптивности [12, 13] и энергосбережения [14].

Настоящая статья является логическим продолжением работы [15], в которой был предложен двухкритериальный алгоритм многопутевой маршрутизации с ускоренной доставкой сообщений, поставляющий дополнительные пути с минимальным числом пересечений. В дальнейшем изложении, нацеленном на оценку эффективности этого алгоритма, можно выделить два основных новых предложения. Первое предложение представлено алгоритмом случайного синтеза тестовых примеров в виде трехмерных графовых моделей сетей. Второе предложение – это результаты статистического исследования эффективности упомянутого алгоритма многопутевой маршрутизации с использованием полученных примеров. Исследование алгоритма проводится в сопоставлении с известным алгоритмом многопутевой маршрутизации, основанном на использовании независимых путей.

Алгоритмы многопутевой маршрутизации. Предварительные сведения. *Традиционная математическая постановка* решаемой задачи заключается в следующем. Предполагается, что анализируемая сеть задана направленным графом $G(E, V)$, где E – множество ребер, V – множество вершин. При этом ребра графа $\{\rho_i \mid i = \overline{1, n}\}$ взвешены значениями $\{w_i \mid i = \overline{1, n}\}$ расстояний между инцидентными вершинами (n – число ребер в графе $G(E, V)$). Требуется для заданной пары вершин графа найти необходимое количество кратчайших непересекающихся путей. Понятно, что успешность решения поставленной задачи зависит от свойств графа и от эффективности применяемых средств анализа. Может так оказаться, что между выделенными вершинами непересекающихся путей нет, либо эти пути не являются кратчайшими. Поэтому на практике предметом поиска могут быть, например, пути с минимальным числом пересечений. Именно эта схема решения обсуждается ниже и в работе [15].

В кратком изложении суть алгоритма состоит в следующем [15]. Сначала для двух выделенных вершин строится кратчайший путь с использованием алгоритма Дейкстры, который использует критерий минимума длины. Далее ребра, принадлежащие этому пути, исключаются из графа $G(E, V)$, а в полученном графе $G'(E', V)$ отыскивается другой путь между теми же вершинами. Однако алгоритм поиска уже несколько иной, отли-

чающийся от алгоритма Дейкстры. В его основе лежит критерий минимума числа пересечений с ранее полученным кратчайшим путем, причем критерий минимума длины используется как вспомогательный. Понятно, что, если требуется построить большее число путей, то описанные действия могут быть продолжены по аналогии.

Приведем алгоритм построения второго (третьего и т.д.) пути [15]. В нем используется сведение двухкритериальной задачи к двум последовательно решаемым однокритериальным задачам. Как уже отмечалось, первым критерием является минимум числа пересечений с ранее полученным кратчайшим путем.

Будем считать пути пересекающимися, если у них имеется хотя бы одна общая вершина. Сопоставим с каждым ребром графа сети векторный вес $\{s_i = (r_i, w_i) \mid i = \overline{1, n}\}$. При этом первая компонента вектора определяется по правилу:

$$r_i = \begin{cases} 0, & \text{если ни одна вершина ребра не принадлежит кратчайшему пути,} \\ 1, & \text{если одна вершина ребра принадлежит кратчайшему пути.} \end{cases}$$

Алгоритм 1.

1. Построить кратчайший путь с использованием алгоритма Дейкстры. Пусть он включает $n_{кр}$ ребер, а его длина равна $l_{кр} = \sum_{i=1}^{n_{кр}} w_{кр,i}$.

2. Перейти к анализу графа $G'(E', V)$, который получается путем исключения из графа $G(E, V)$ ребер кратчайшего пути.

3. Построить в графе $G'(E', V)$ дублирующий путь с использованием алгоритма, который отличается от алгоритма Дейкстры содержанием правил обработки весов $\{S_j = (R_j, W_j) \mid j = \overline{1, m}\}$ в вершинах $\{v_j \mid j = \overline{1, m}\}$ графа $G'(E', V)$, имеющими для ребра ρ , инцидентного вершинам v_k и v_j , следующий вид:

$$\begin{aligned} \blacklozenge \quad R_j(t+1) &= \min \{(R_k(t) + r_i), R_j(t)\}, \\ \blacklozenge \quad W_j(t+1) &= \begin{cases} W_k(t) + w_i, & \text{если } (R_k(t) + r_i) < R_j(t), \\ \min\{W_k(t) + w_i, W_j(t)\}, & \text{если } (R_k(t) + r_i) = R_j(t). \end{cases} \end{aligned}$$

Упорядочивание очереди сообщений. В рассматриваемой сети узлы с заданным периодом передают пакеты сообщений, которые состоят из собственных сообщений, сгенерированных передающим абонентом, а также из сообщений, полученных от других абонентов на предыдущем периоде, и которые необходимо ретранслировать. Известно, что в общем случае различным упорядоченностям сообщений, передаваемых узлом, будет соответствовать различная оперативность доставки сообщений. С правилами упорядочивания можно познакомиться в работах [15, 16]. В результате реализация многопутевых маршрутов будет включать три этапа и выглядит следующим образом. На первом этапе сформированная выходная очередь сообщений упорядочивается, как и в случае однопутевой маршрутизации в соответствии с упомянутыми правилами, обеспечивая сокращение времени доставки при однопутевой маршрутизации. На втором этапе преобразованная очередь распределяется между путями доставки с сохранением достигнутой упорядоченности и обеспечением сбалансированности нагрузки на основе длины путей. На третьем этапе происходит восстановление исходной очереди при приеме. Следует оговориться, что предлагаемое решение в общем случае является приближенным.

Синтез трехмерной графовой модели сети АНПА при ограничениях. В настоящем разделе описывается подход к анализу эффективности алгоритмов маршрутизации в сетях АНПА. Проблема получения объективной оценки эффективности некоторого алгоритма является достаточно сложной. Один из общепризнанных путей состоит в использовании случайным образом генерируемых примеров [17, 18]. Суть предлагаемого подхода состоит в следующем. С помощью предлагаемых средств автоматически и случайным образом синтезируются примеры моделей для сетей АНПА в виде трехмерных графов информационных связей аппаратов. На каждой модели апробируются алгоритмы маршрутизации, при этом эффективность их применения оценивается статистически. На первый взгляд, реализация этого подхода не должна вызывать проблем. Действительно, можно пойти по следующему пути. Задать числом n вершин в искомым графе. Да-

лее случайным образом выбрать дерево будущего графа. Для этого можно воспользоваться кодом Прюфера Х. [19], случайный выбор которого позволяет однозначно сформировать остовное дерево графа. Вводя тем или иным образом желаемое число замыкающих ребер, получаем окончательный циклический граф с заданным числом базовых циклов, который можно рассматривать как модель некоторой сети. Этот прием, основанный на использовании плоских графов, был применен авторами в работе [20] при исследовании алгоритмов назначения заданий в распределенных вычислительных системах.

Однако на этом пути в данном случае возникает проблема адекватности полученной модели по отношению к физически реализуемой сети. Действительно, уместно вспомнить, что гидроакустический канал связи, используемый в сетях АНПА, возникает между аппаратами всякий раз, когда расстояние между ними оказывается не больше максимально допустимого значения d_0 . Если процедура построения модели не учитывает этого ограничения, то получаемая модель в общем случае не будет отражать некоторые из реально существующих в сети каналов связи. От этого недостатка свободен предлагаемый подход.

Понятно, что для учета этого ограничения синтезируемый трехмерный граф должен быть размещен в евклидовом пространстве. Формально цель состоит в переносе заданного графа из двухмерного неметрического в трехмерное евклидово пространство с выполнением набора ограничений на межвершинные расстояния. В принципе описанные действия могут быть продолжены до успешного завершения с привлечением генетического алгоритма. Такая попытка была осуществлена авторами и продемонстрировала существенно ограниченные возможности подобного подхода по размерности синтезируемых за приемлемое время графов. В связи с этим был предложен и реализован другой подход, описываемый ниже.

В предложенном подходе для учета ограничений на межвершинные расстояния будем считать, что в трехмерном пространстве набором взаимно перпендикулярных плоскостей задана равномерная сетка, разбивающая пространство на элементарные ячейки. При этом форма ячейки кубическая с ребром d , где

$$d \leq d_0 < \sqrt{2}d.$$

Будем располагать вершины графа только в узлах сетки, а ребра графа – только по линиям сетки. В результате каждая его вершина будет характеризоваться тремя координатами. При этом между смежными вершинами графа будет расстояние d , а между его несмежными вершинами – больше d . На рис. 1 ниже приведен пример, когда граф типа дерево (рис. 1,а), содержащий пять вершин, размещен в одной ячейке с соблюдением выдвинутого требования (рис. 1,б).



Рис. 1. Пример размещения дерева (а) в графе (б)

Перечислим характеристики, учет которых при соответствующей конкретизации важен для процесса размещения во фрагменте любого масштаба. Прежде всего, заметим, что в размещенное в кубе (рис. 1,б) дерево нельзя добавить ни одного ребра без нарушения ограничения. Действительно, в этом случае любая новая вершин окажется смежной с какой-либо уже существующей вершиной дерева, а значит, возникнет дополнительный не предусмотренный на рис. 1,а канал. Еще одна важная характеристика рассматриваемого случая – в кубе можно разместить дерево со степенью вершин не более трех. Наконец, последнее очевидное свойство – для организации цикла в размещенном графе необходимо включение в него хотя бы двух дополнительных ребер и хотя бы одной дополнительной вершины.

Нетрудно видеть, что процесс размещения в сетке дерева с большим количеством вершин характеризуется высокой трудоемкостью. Для ее сокращения можно пойти по следующему пути, а именно, ограничиться размещением относительно небольшого графа в существенно ограниченном фрагменте сетки, а затем получать неограниченно сложные встроенные графы путем объединения этих базовых фрагментов. Ниже описывается реализация именно этой идеи.

В качестве базового фрагмента предлагается выбрать куб, объединяющий восемь простейших кубов (рис. 2) (в дальнейшем просто «куб»). Он характеризуется множеством из 27 вершин.

Конечно, такой выбор основан только на интуиции. Размеры фрагмента позволяют при невысоком уровне трудоемкости размещать в нем достаточно сложные графы. Конечно, возможны и другие решения. Подытожим основные шаги предлагаемого алгоритма.

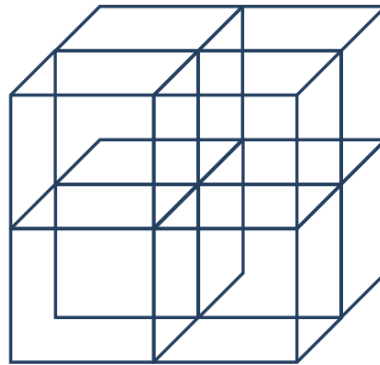


Рис. 2. Базовый фрагмент сетки – куб

Алгоритм 2.

1. Выделить по случайным образом сформированному коду Прюфера порождающее дерево, которое содержит $n \leq 27$ вершин, а степень вершин не превышает 6.
2. Разместить выбранное дерево в восьмикубовом фрагменте.
3. Исключить в размещенном дереве висячие вершины путем введения замыкающих цепочек ребер между ними, используя алгоритм поиска в ширину.
4. Сформировать сложный композиционный граф путем соединения восьмикубовых фрагментов.

Уточним содержание п.2 алгоритма 1. В основу его реализации положен перебор вариантов.

Алгоритм 3.

1. Разместить вершину дерева с максимальной степенью в вершине 8-куба с наименьшей степенью.
2. Разместить инцидентные ей ребра по линиям сетки.
3. Для каждого ребра разместить смежные с ним ребра. Если при размещении нарушаются ограничения, то перейти к другому варианту. Если список вариантов исчерпан, то граф не размещается в 8-кубе.

Пример. Разместим в 8-кубе дерево с десятью вершинами (рис. 3).

Получаем (рис. 4).

Добавим в размещенное дерево замыкающие цепочки. Вершины 5 и 10 соединяются цепочкой (5, 11, 12, 13, 10). Проверяем, не образовались ли попутно новые ребра. В данном случае такое ребро есть – (7, 11). Появляется цикл (5, 2, 7, 11). Вершины 6 и 8 соединяются через дополнительную вершину 14. Вершины 9 и 10 соединяются через дополнительную вершину 15. В результате получаем граф (рис. 5).

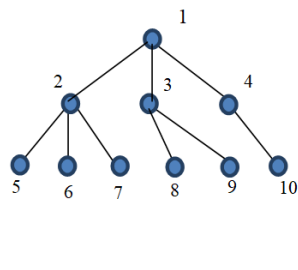


Рис. 3. Пример дерева

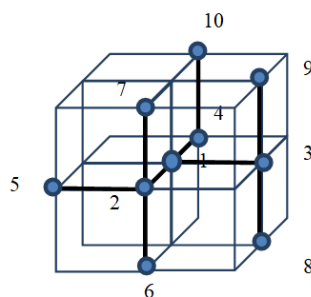


Рис. 4. Куб с размещенным в нем деревом

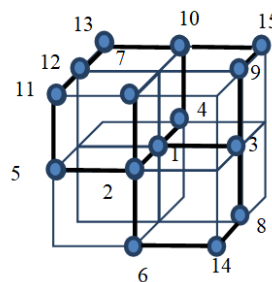


Рис. 5. Куб с размещенным в нем графом

Несколько слов о синтезе композиционных графов. Соединять два куба можно, совместив две их грани. Достаточным условием совмещения двух граней является их идентичность. При этом можно формировать композиционные графы, используя один и тот же куб с размещенным в нем деревом. В примере правую грань можно совместить с такой же гранью другого куба, развернутого соответствующим образом. Понятно, что, выстраивая из кубов новые фигуры, можно пойти разными путями, получая разные результирующие архитектуры. Так, например, можно вытягивать новую фигуру в цепочку, можно выстраивать некоторый «мегакуб», можно компоновать фигуру случайным образом. По-видимому, эти варианты будут обладать разными свойствами с точки зрения многопутевой маршрутизации. В следующем разделе приводятся некоторые результаты исследования этих свойств (рис. 6–9).

Результаты моделирования. При моделировании использовались алгоритмы 1–3 с размещением в кубе графов с порождающими деревьями из 15-ти вершин. Размещалось 100 различных графов с последующим осреднением результатов. Композиционные графы с архитектурой «цепочка» (рис. 6–9) содержали от одного до пяти кубов, а графы с архитектурой «мегакуб» (рис. 10, 11) – 27 кубов. Моделировалась работа алгоритмов с удалением и без удаления ребер при использовании двух или трех путей. Ускорение времени доставки (ось ординат) оценивалось отношением величины ускорения к времени однопутевой доставки. В каждом модельном эксперименте в сети выделялись два наиболее удаленных друг от друга узла, между которыми организовывался целевой (исследуемый) поток с назначаемой очередью от 10 до 100 сообщений (ось абсцисс). При этом в каждом из узлов сети формировались собственные сообщения, число которых варьировалось и определяло степень загрузки сети от 20% до 80% (параметр семейства графиков).

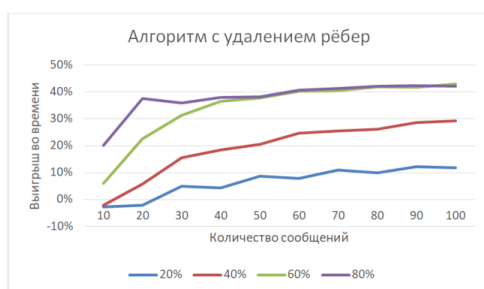


Рис. 6. Архитектура «цепочка» (два куба)

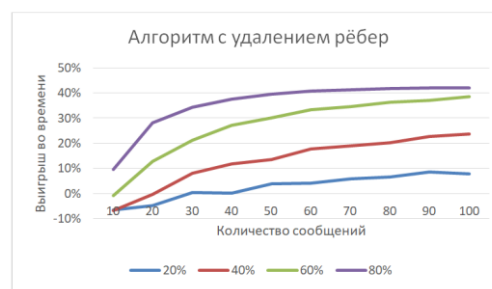


Рис. 7. Архитектура «цепочка» (пять кубов)

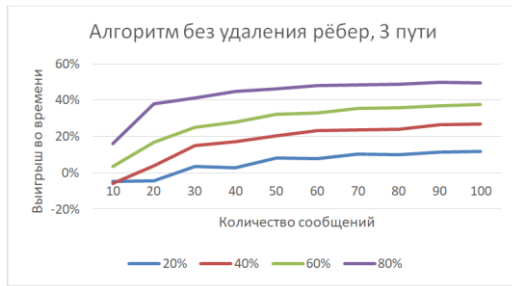


Рис. 8. Архитектура «цепочка» (два куба)

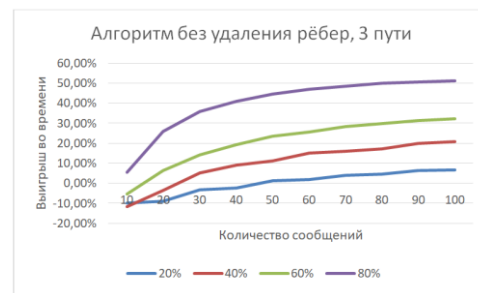


Рис. 9. Архитектура «цепочка» (пять кубов)

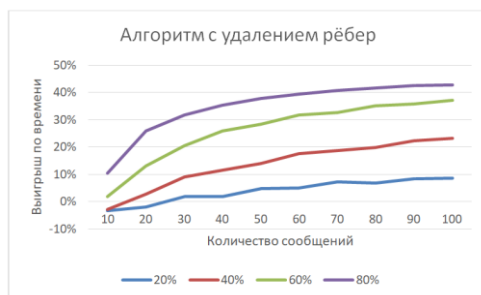


Рис. 10. Архитектура «мегакуб» (27 кубов)

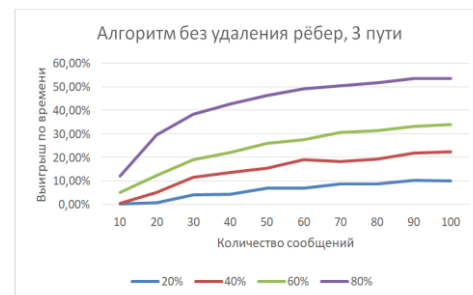


Рис. 11. Архитектура «мегакуб» (27 кубов)

На рис. 10 и 11 представлены результаты моделирования при архитектуре «мегакуб», где демонстрируется некоторое повышение эффективности.

Обсуждение. Приведенные выше графики, хоть и отражают лишь незначительную часть полученных результатов, являются достаточно показательными. В частности они демонстрируют характер нарастания выигрыша с увеличением длины очереди в целевом потоке, и при этом незначительную эффективность или даже вред многопутевой маршрутизации при малонагруженной сети. Примечательно нарастание ее полезности с ростом загруженности сети и ростом протяженности «цепочки». Такого же уровня рост демонстрируется при переходе от алгоритма, не допускающего пересечения используемых путей к алгоритму, допускающему такое пересечение.

Заключение. В статье исследуются характеристики некоторой технологии многопутевой маршрутизации сообщений в телекоммуникационной сети АНПА. Она предполагает последовательное решение задач поиска набора путей для передачи сообщений, оптимального упорядочивания выходной очереди сообщений с целью ускорения доставки сообщений и последующее распределение очереди между найденными путями. В статье предлагается подход к исследованию эффективности алгоритмов многопутевой маршрутизации сообщений, основанный на случайном синтезе адекватных трехмерных моделей сетей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hentati A.I., Fourati L.C. Comprehensive survey of UAVs communication networks // Comput. Stand. Interfaces. – 2020. – Vol. 72. – Art. 103451.
2. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. – Владивосток: Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук, 2018. – 368 с.

3. Инзарцев А.В., Елисеенко Г.Д., Павин А. М., Панин М.А. Обнаружение и обследование локальных донных объектов с помощью группы специализированных автономных подводных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 1.
4. Кузнецов К.А., Парамонов А.И., Мутханна А.С.А., Кучерявый А.Е. Модель и методы маршрутизации трафика в сети связи с использованием БПЛА // Тр. учебных заведений связи. – 2024. – Т. 10, № 4. – С. 62-72.
5. Кормен Т.Х., Лейзерсон Ч.И., Ривест Р.Л., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. – М.: Вильямс, 2010. – 1296 с.
6. Шувалов В.П., Вараксина И.Ю. Классификация методов многопутевой маршрутизации // T-comm. – 2014. – № 1.
7. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Control of Multipath Transmissions in the Nodes of Switching Segments of Reserved Paths // 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). – 2022. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/ICCT56057.2022.9976839.
8. Еременко А.С. Потокковая модель многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям в телекоммуникационной сети // Проблемы телекоммуникаций. – 2015. – № 1. – С. 85-93.
9. Zuo, Y., Ling, Z., Yuan, Y.A. Hybrid multi-path routing algorithm for industrial wireless mesh networks // J Wireless Com Network. – 2013. – 82 (2013).
10. Venkatesh K., Srinivas L., Krishnan M.M., Shanthini A. QoS improvisation of delay sensitive communication using SDN based multipath routing for medical applications // Future Generation Computer Systems. – 2019. – 93. – P. 256-65.
11. Ducatelle F, Di Caro GA, Gambardella L.M. Ant agents for hybrid multipath routing in mobile ad hoc networks // Proceedings of the Second Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS 2005). St Moritz, 19–21 January 2005. – P. 44-53.
12. Sahhaf S., Tavernier W., Colle D., Pickavet M. Adaptive and reliable multipath provisioning for media transfer in SDN-based overlay networks // Computer Communications. – 2017. – 106. – P. 107-16.
13. Корячко В.П., Перепелкин Д.А. Разработка и исследование математической модели многопутевой адаптивной маршрутизации в сетях связи с балансировкой нагрузки // Электросвязь. – 2014. – № 12.
14. Rajasekaran K., Balasubramanian K. Energy Conscious based Multipath Routing Algorithm in WSN // International Journal of Computer Network and Information Security (IJCNIS). – 2016. – Vol. 8, No. 1. – P. 27-34.
15. Грузликов А.М., Колесов Н.В., Литуненко Е.Г., Тюльников В.С. Многопутевая маршрутизация в сетях с ускоренной доставкой сообщений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2026. – № 1. – С. 62-72.
16. Грузликов А.М., Колесов Н.В., Литуненко Е.Г., Скородумов Ю.М. Оптимизация информационных обменов в сети автономных абонентов // ТиСУ. – 2022. – № 6.
17. Frieze A., Karonsky M. Introduction to random graphs. – Cambridge University Press, 2025. – 698 p.
18. van der Hofstad R. Random graphs and complex networks. – Vol. 2. – Eindhoven University Press, 2024. – 508 p.
19. Prüfer H. Neuer Beweis eines Satzes über Permutationen // Arch. Math. Phys. – 1918.
20. Грузликов А.М., Колесов Н.В., Толмачева М.В., Скородумов Ю.М. Графовый подход к назначению заданий в распределенных системах реального времени // ТиСУ. – 2014. – № 4. – С. 28-38.

REFERENCES

1. Hentati A.I., Fourati L.C. Comprehensive survey of UAVs communication networks, *Comput. Stand. Interfaces*, 2020, Vol. 72, Art. 103451.
2. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы: sistemy, tekhnologii, primeneniye [Underwater robotic systems: systems, technologies, applications]. Vladivostok: Institut problem morskikh tekhnologiy Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk, 2018, 368 p.
3. Inzartsev A.V., Eliseenko G.D., Pavin A. M., Panin M.A. Obnaruzhenie i obsledovanie lokal'nykh donnykh ob"ektov s pomoshch'yu gruppy spetsializirovannykh avtonomnykh podvodnykh ob"ektov [Detection and inspection of local bottom objects using a group of specialized autonomous underwater objects], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 1.
4. Kuznetsov K.A., Paramonov A.I., Muthanna A.S.A., Kucheryavyy A.E. Model' i metody marshrutizatsii trafika v seti svyazi s ispol'zovaniem BPLA [Model and methods of traffic routing in a communication network using UAVs], *Tr. uchebnykh zavedeniy svyazi* [Proceedings of Educational Institutions of Communication], 2024, Vol. 10, No. 4, pp. 62-72.
5. Kormen T.Kh., Leyzerson Ch.I., Rivest R.L., Shtayn K. Algoritmy: postroenie i analiz [Algorithms: construction and analysis]. Moscow: Vil'yams, 2010, 1296 p.
6. Shuvalov V.P., Varaksina I.Yu. Klassifikatsiya metodov mnogoputevoy marshrutizatsii [Classification of multipath routing methods], *T-comm*, 2014, No. 1.

7. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Control of Multipath Transmissions in the Nodes of Switching Segments of Reserved Paths, *2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, 2022, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICCT56057.2022.9976839.
8. Eremenko A.S. Potokovaya model' mnogoputevoy marshrutizatsii po neperesekeyushchimsya putyam v telekommunikatsionnoy seti [Flow model of multipath routing along non-intersecting paths in a telecommunication network], *Problemy telekommunikatsiy* [Problems of Telecommunications], 2015, No. 1, pp. 85-93.
9. Zuo, Y., Ling, Z., Yuan, Y.A. Hybrid multi-path routing algorithm for industrial wireless mesh networks, *J Wireless Com Network*, 2013, 82 (2013).
10. Venkatesh K., Srinivas L., Krishnan M.M., Shanthini A. QoS improvisation of delay sensitive communication using SDN based multipath routing for medical applications, *Future Generation Computer Systems*, 2019, 93, pp. 256-65.
11. Ducatelle F, Di Caro GA, Gambardella L.M. Ant agents for hybrid multipath routing in mobile ad hoc networks, *Proceedings of the Second Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS 2005). St Moritz, 19–21 January 2005*, pp. 44-53.
12. Sahhaf S., Tavernier W., Colle D., Pickavet M. Adaptive and reliable multipath provisioning for media transfer in SDN-based overlay networks, *Computer Communications*, 2017, 106, pp. 107-16.
13. Koryachko V.P., Perepelkin D.A. Razrabotka i issledovanie matematicheskoy modeli mnogoputevoy adaptivnoy marshrutizatsii v setyakh svyazi s balansirovkoj nagruzki [Development and research of a mathematical model of multipath adaptive routing in communication networks with load balancing], *Elektrosvyaz* [Electrosvyaz], 2014, No. 12.
14. Rajasekaran K., Balasubramanian K. Energy Conscious based Multipath Routing Algorithm in WSN, *International Journal of Computer Network and Information Security (IJCNIS)*, 2016, Vol. 8, No. 1, pp. 27-34.
15. Gruzlikov A.M., Kolesov N.V., Litunen E.G., Tyul'nikov V.S. Mnogoputevaya marshrutizatsiya v setyakh s uskorennoy dostavkoj soobshcheniy [Multipath routing in networks with accelerated message delivery], *Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Bulletin of Information Technology, Mechanics and Optics], 2026, No. 1, pp. 62-72.
16. Gruzlikov A.M., Kolesov N.V., Litunen E.G., Skorodumov Yu.M. Optimizatsiya informatsionnykh obmenov v seti avtonomnykh abonentov [Optimization of information exchanges in the network of autonomous subscribers], *TiSU* [Theory and Control Systems], 2022, No. 6.
17. Frieze A., Karonsky M. Introduction to random graphs. Cambridge University Press, 2025, 698 p.
18. van der Hofstad R. Random graphs and complex networks. Vol. 2. Eindhoven University Press, 2024, 508 p.
19. Prüfer H. Neuer Beweis eines Satzes über Permutationen, *Arch. Math. Phys.*, 1918.
20. Gruzlikov A.M., Kolesov N.V., Tolmacheva M.V., Skorodumov Yu.M. Grafovyy podkhod k naznacheniyu zadaniy v raspredelennykh sistemakh real'nogo vremeni [Graph approach to task assignment in distributed real-time systems], *TiSU* [Theory and Control Systems], 2014, No. 4, pp. 28-38.

Колесов Николай Викторович – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: kolesovnv@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89213886806; д.т.н.; профессор; г.н.с.

Грузликов Александр Михайлович – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: agruzlikov@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89312664852; к.т.н.; начальник отдела.

Скородумов Юрий Михайлович – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: skorum@email.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89112861889; к.т.н.; начальник лаборатории.

Тюльников Виктор Сергеевич – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: viktor.tyulnikov@gmail.com; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89119757141; инженер-программист 2-й категории.

Kolesov Nikolai Viktorovich – Concern CSRI Elektropribor, JSC; e-mail: kolesovnv@mail.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79213886806; dr. of eng. sc.; professor; chief researcher.

Gruzlikov Alexander Mikhailovich – Concern CSRI Elektropribor, JSC; e-mail: agruzlikov@yandex.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79312664852; cand. of eng. sc.; head of department.

Skorodumov Yuri Mikhailovich – Concern CSRI Elektropribor, JSC; e-mail: skorum@mail.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79112861889; cand. of eng. sc.; head of laboratory.

Tiulnikov Viktor Sergeevich – Concern CSRI Elektropribor, JSC; e-mail: viktor.tyulnikov@gmail.com; Saint Petersburg, Russia; phone: +79119757141; software engineer.

А.М. Корсаков, В.В. Иванова**ОРГАНИЗАЦИЯ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ
КОГНИТИВНОГО КАРТИРОВАНИЯ**

Рассматривается актуальная задача обеспечения автономности мобильных роботов в сложных условиях, когда использование традиционных навигационных методов, основанных на глобальных системах координат и спутниковых данных, невозможно или неэффективно. Для решения данной проблемы предлагается подход, основанный на когнитивной (интерпретирующей) навигации, где основную роль играет семантическое понимание среды. Ключевой особенностью метода является построение когнитивной карты – семантически ориентированного графа, вершины которого соответствуют объектам-ориентирам (либо группам однородных ориентиров), а рёбра – фиксированным наборам информационно-двигательных действий (элементарным обусловленным паттернам поведения). Таким образом маршрут робота при его движении по когнитивной карте сводится к фиксированному набору информационно-двигательных действий. Процесс построения карты осуществляется автоматически на основе предварительно полученного семантически сегментированного изображения местности, что позволяет мобильному роботу априори получить информацию о взаимном расположении и форме ориентиров. Для формализации процесса навигации и управления поведением робота на основе когнитивной карты авторами предложен специально разработанный формальный язык LRNB (Language of Robot Navigation Behavior). Этот язык позволяет декомпозировать сложные миссии на элементарные информационно-двигательные действия, задавать условия их завершения и описывать сценарии взаимодействия с динамическими и статическими объектами. В работе описаны принципы построения когнитивной карты, синтаксис языка LRNB, а также механизм формирования маршрута как последовательности команд. Практическая часть включает результаты верификации подхода в условиях симуляции с использованием специально разработанного эмулятора, а также предварительные натурные испытания на лабораторном гусеничном мобильном роботе, подтвердившие принципиальную работоспособность предложенного подхода. Полученные результаты свидетельствуют о потенциале метода для применения в критически важных сценариях, таких как зоны стихийных бедствий, области радиоэлектронного подавления и другие среды с высокой степенью неопределённости. Предложены дальнейшие планы работ, связанные с приближением условий экспериментов к реальным условиям возможной эксплуатации.

Когнитивная навигация; семантическая сегментация; когнитивная карта; формальный язык; мобильный робот.

A.M. Korsakov, V.V. Ivanova**ORGANIZATION OF MOBILE ROBOTS NAVIGATION BASED
ON COGNITIVE MAPPING**

The article addresses the relevant task of ensuring the autonomy of mobile robots in complex conditions, where the use of traditional navigation methods based on global coordinate systems and satellite data is impossible or ineffective. To solve this problem, an approach based on cognitive (interpretive) navigation is proposed, where semantic understanding of the environment plays the central role. The key feature of the method is the construction of a cognitive map – a semantically oriented graph whose vertices correspond to landmark objects (or groups of homogeneous landmarks), and whose edges correspond to fixed sets of information-motor actions (elementary conditioned behavioral patterns). Thus, the robot's route while moving along the cognitive map is reduced to a fixed set of information-motor actions. The map construction process is carried out automatically based on a pre-obtained semantically segmented image of the terrain, which allows the mobile robot to acquire a priori information about the relative positions and shapes of the landmarks. To formalize the navigation process and manage the robot's behavior based on the cognitive map, the authors propose a specially developed formal language, LRNB (Language of Robot Navigation Behavior). This language allows the decomposition of complex missions into elementary information-motor actions, the specification of their completion conditions, and the description of interaction scenarios with dynamic and static objects. The work details the principles of building a cognitive map, the syntax of the LRNB language, and the mechanism for forming a route as a sequence of commands. The practical part includes the results of verifying the approach in a simulation environment using a specially developed emulator, as well as preliminary

inary field tests on a laboratory tracked mobile robot, which confirmed the fundamental feasibility of the proposed approach. The obtained results indicate the potential of the method for application in critically important scenarios, such as disaster zones, areas of electronic warfare, and other environments with a high degree of uncertainty. Further work plans are proposed, related to bringing experimental conditions closer to the real-world conditions of potential operation.

Cognitive navigation; semantic segmentation; cognitive map; formal language; mobile robot.

Введение. Одной из ключевых задач современной робототехники является обеспечение автономности мобильных роботов (МР) при выполнении навигационных задач в сложных недетерминированных средах [1]. Традиционные подходы к навигации, основанные на точном позиционировании в глобальной системе координат с использованием данных спутниковых навигационных систем (ГНСС), инерциальных датчиков или предварительно загруженных карт, зачастую оказываются неприменимы в условиях помех, радиомолчания, динамически изменяющейся обстановки или при отсутствии заранее известной метрической модели пространства. При указанных условиях возрастает актуальность методов, позволяющих роботу ориентироваться и принимать решения на основе непосредственного восприятия и семантического понимания окружающего мира.

Перспективным направлением при решении этой проблемы является когнитивная (интерпретирующая) навигация, основанная на построении и использовании когнитивных карт – семантических структур, отражающих пространство в терминах доступных для робота объектов-ориентиров и отношений между ними [2]. В результате навигация строится не на вычислении координат, а на семантической интерпретации сцены, где каждое действие робота определяется контекстом воспринимаемых им ориентиров. Такой принцип позволяет роботу функционировать без привязки к глобальной системе координат [3, 4]. Последнее особенно актуально в зонах стихийных бедствий, в условиях разрушения инфраструктуры, радиоэлектронной борьбы и подавления сигналов GPS и ГЛОНАСС, в условиях плотной высотной застройки, в полярных и высокогорных регионах и пр.

В робототехнике когнитивное картирование представляет собой активно развивающееся междисциплинарное направление, объединяющее методы компьютерного зрения, семантической обработки данных, теории графов и машинного обучения [5]. Существует множество подходов к построению когнитивных карт: на основе графов [6, 7], векторных и потенциальных полей [8], теории множеств [9], семантического SLAM [10–14] и моделей пространственной памяти [15]. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и ограничения, связанные с особенностями представления пространства, вычислительной сложностью, устойчивостью к ошибкам идентификации и способностью работать в реальном времени. Однако общей чертой этих подходов является отказ от жёсткой привязки к глобальной системе координат в пользу семантического представления среды.

Однако несмотря на многообразие подходов, актуальной остаётся задача создания унифицированного формального аппарата для описания навигационного поведения робота, который был бы независим от конкретного набора используемых сенсоров и исполнительных механизмов, но при этом позволял бы задавать сложные, условные сценарии перемещения в терминах семантических ориентиров. Такой аппарат необходим для стыковки высокоуровневого планирования на основе когнитивной карты с низкоуровневыми системами управления роботом.

В данной статье рассматривается подход к организации навигации мобильного робота, основанный на построении когнитивной карты по семантически сегментированному изображению местности. Для этого в качестве основного инструмента предложен формальный язык описания навигационного поведения LRNB (Language of Robot Navigation Behavior), ориентированный на спецификацию информационно-двигательных действий (ИДД) – элементарных паттернов поведения, связывающих восприятие семантических ориентиров с базовыми операциями движения. Такой подход позволяет роботу функционировать автономно, без связи с оператором и без доступа к данным о собственном точном положении в мировой системе координат, что критически важно для применения в условиях неопределённости и информационных ограничений.

Целью работы является демонстрация работоспособности предложенного подхода на примере решения задачи глобальной навигации – перемещения робота между заданными семантическими ориентирами в условиях отсутствия информации о его глобальных координатах. В статье описывается разработанный эмулятор для отладки навигационных сценариев, приводятся результаты предварительных экспериментов как в симуляции, так и на реальном гусеничном роботе, предложены дальнейшие направления исследований.

В следующем – втором – разделе дана постановка задачи интерпретирующей навигации и введены основные определения. Третий раздел посвящён методу построения когнитивной карты по семантически сегментированному изображению. В разделе четыре представлен формальный язык LRNB для описания информационно-двигательных действий. В разделе пять приведены результаты модельных экспериментов в эмуляторе и предварительных испытаний на реальном роботе. В заключении подведены итоги и намечены перспективы дальнейшей работы.

Постановка задачи. В качестве основной миссии мобильного робота (МР) в рамках решения задачи глобальной навигации будем рассматривать движение из некоторой начальной точки в некоторую выбранную (оператором, либо СУ мобильного робота) конечную точку. При этом подразумевается отсутствие связи с оператором, кроме момента задания миссии МР. Кроме того, требованием к разрабатываемой системе навигации является отсутствие возможности получения координат и ориентации МР в мировой системе координат при выполнении миссии.

Для решения задачи глобальной навигации в указанных условиях представляется необходимым использовать подход, связанный с организацией интерпретирующей навигации на базе когнитивного представления пространства. Суть интерпретирующей навигации заключается в том, что положение МР на местности определяется не в декартовой системе координат (ДСК), а на основе описаний окружающего пространства на языке видимых особенностей среды – ориентиров. При этом аналогом количественной модели ДСК выступает иная модель – ориентированный граф (когнитивная карта), вершинам которого соответствуют ориентиры, либо группы однородных ориентиров, а рёбрам – набор информационно-двигательных действий (ИДД). Т.е. организация передвижения МР основывается на фиксированном наборе ИДД. Таким образом, под когнитивным представлением пространства будем понимать представление, основанное на построении когнитивной карты.

Дадим определения возможных действий МР при его передвижении по когнитивной карте:

- ♦ типовая технологическая операция (ТОП) [16]. Под ТОП будем понимать элементарное безусловное действие (в случае рассматриваемого далее гусеничного МР, это движение прямо, танковый поворот налево/направо и остановка),
- ♦ информационно-двигательное действие (ИДД). Под ИДД будем понимать элементарное обусловленное действие. На каждой итерации расчёта выполнения конкретного ИДД входом для него является вектор показаний сенсоров, а выходом – одна из ТОП,
- ♦ сценарий. Под сценарием будем понимать набор нескольких ИДД, необходимый для решения некоторой частной локальной задачи,
- ♦ миссия. Под миссией будем понимать набор нескольких сценариев и/или ИДД, необходимый для решения некоторой функционально завершённой полезной задачи.

Доступный набор ИДД в каждом конкретном случае должен зависеть от функциональных возможностей МР и от установленных на нём сенсоров. При этом при начальном построении когнитивной карты и задании маршрута (миссии), требуемый для его выполнения набор ИДД должен формироваться автоматически, а при динамическом изменении когнитивной карты, автоматически должен меняться и набор ИДД.

При работе с ориентирами важно учитывать, что каждый отдельный ориентир имеет двойную идентификацию:

- ♦ абсолютный идентификатор, т.е. метка ориентира для стороннего наблюдателя (не доступен МР),
- ♦ относительный идентификатор, т.е. метка ориентира, присваиваемая ему в результате решения задачи классификации (доступен МР).

Также необходимо отметить, что вопросы, связанные со способами выполнения конкретных ИДД (локальная навигация), например, регулятор, обеспечивающий движение МР на заданном расстоянии от препятствия и т.п., в настоящей работе раскрываться не будут. Необходимые описания таких способов будут даны в следующих работах авторов.

Построение когнитивной карты. Авторами рассматриваются три способа построения когнитивной карты: по семантически сегментированному изображению; динамически, в процессе исследования МР местности; по речевому (либо текстовому) сообщению оператора с использованием больших языковых моделей (БЯМ). Далее будет использоваться первый из указанных способов.

Под семантически сегментированным изображением (рис. 1) будем понимать некоторое изображение местности (вид сверху), где каждой из выделенных областей соответствует свой относительный идентификатор. Основой для такого изображения может служить реальный фотоснимок (полученный со спутника, БЛА и т.д.), который затем должен быть сегментирован с последующей классификацией полученных сегментов. Пример разработанной модели семантической сегментации можно найти в работе [17].

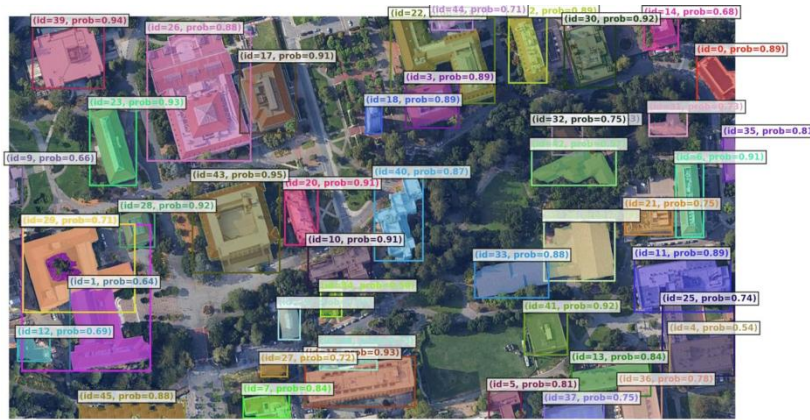


Рис. 1. Пример семантически сегментированного изображения [18]

Использование данного подхода дает ряд существенных преимуществ: еще до начала выполнения миссии МР возможно получить общее представление о форме ориентиров, их взаимном расположении и относительных расстояниях между ними, а также сразу построить исходную когнитивную карту.

Однако у данного подхода есть и существенный недостаток: необходимость гарантировать тождественность идентификации ориентиров (присвоение одного и того же относительного идентификатора) как сенсорами, установленными на борту МР, так и классификатором, используемым при создании семантически сегментированного изображения.

После того, как семантически сегментированное изображение было сформировано, оно может быть использовано для построения когнитивной карты. Опишем способ построения когнитивной карты по семантически сегментированному изображению. В качестве узлов будем использовать выделенные на семантически сегментированном изображении ориентиры. Используя каждый отдельный узел в качестве вершины, можно разбить пространство вокруг него на N секторов (в настоящей работе N было принято равным четырём), после чего определить в каждом секторе ближайший соседний к нему узел. Именно к этим соседним узлам и строится направленное ребро от данного узла. Будем называть такие узлы «узлами-соседями». Отметим, что относительные идентификаторы узлов-соседей и порядок их следования являются дополнительным дескриптором данного узла-ориентира. Относительные идентификаторы узлов-соседей и порядок их следования будем называть «структурным признаком» данного узла.

После построения когнитивной карты оператор имеет возможность выбрать целевой ориентир. Далее происходит построение кратчайшего маршрута до целевого ориентира одним из стандартных методов нахождения оптимального пути внутри графа от одного узла до другого, например, методом поиска в ширину (BFS, Breadth-First Search).

Как было указано выше, одним из преимуществ построения когнитивной карты на основе семантически сегментированного изображения является имеющееся изначально общее представление о форме ориентиров. Следствием из данного преимущества является возможность описания ориентиров одним из геометрических примитивов (что в дальнейшем позволяет стандартизировать ИДД). На рис. 2 представлена когнитивная карта и маршрут мобильного робота, построенные по геометрическим примитивам, соответствующим отдельным ориентирам.

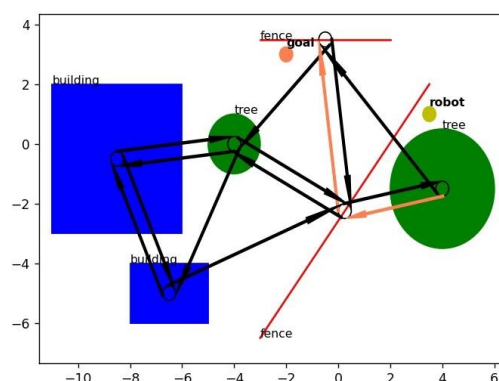


Рис. 2. Когнитивная карта и построенный маршрут при описании ориентиров геометрическими примитивами

На рис. 2 ориентиры обозначены цветными прямоугольниками, окружностями и отрезками; чёрными окружностями – узлы графа; стрелками – рёбра графов; причём оранжевым отмечены рёбра, соответствующие построенному маршруту. Кроме того, рисунок иллюстрирует возможность учитывать форму ориентиров. Как видно из рисунка, в данном случае маршрут построен не по кратчайшему ребру, а с учётом потенциально возникающего при движении препятствия – ориентира с меткой *fence*.

Здесь уместно ещё раз напомнить, что при использовании любого из подходов к построению когнитивной карты (в том числе – описанного выше), ребру графа соответствует некоторый фиксированный набор ИДД. Предлагаемый способ описания ИДД представлен в следующем разделе.

Формальный язык описания информационно-двигательных действий. С целью формализации навигационного поведения МР, авторами статьи предлагается новый формальный язык описания навигационного поведения МР LRNB (Language of Robot Navigation Behavior). Поскольку в представленной в настоящей статье постановке навигационное поведение робота сводится к набору ИДД, то и LRNB был сведён к формальному языку описания ИДД. Необходимо ещё раз подчеркнуть, что ИДД задаёт именно запрос на само поведение МР. Например, «подойди к ориентиру», «повернись к ориентиру», «следуй вдоль ориентира» и т.п. Конкретный способ реализации ИДД может быть различным и зависеть как от типа МР, так и от установленных на нём сенсоров.

Для описания одного ИДД на LRNB будем использовать термин «команда». В качестве универсального решения предлагается строить отвечающие отдельным ИДД команды из восьми лексем. Структура такой команды показана на рисунке 3.

На рис. 3 «Действие» является оператором команды (далее будем непосредственно использовать термин «действие»); тогда как «объект действия», «объект завершения действия» и «условие завершения действия» – параметрами команды.

Действие (зелёные блоки на рисунке 3) определяет характер изменения положения и ориентации МР в мировой системе координат. Авторами введено четыре термина, задающих действие: *unknown* (действие не задано), *wait* (ожидание; линейные перемещения и повороты вокруг главных осей МР запрещены), *turn* (поворот; линейные перемещения запрещены) и *go* (движение; разрешает заданное линейное перемещение, любой поворот

вокруг главных осей и остановку). В качестве аргументов действия в LRNB введены следующие термы: *any*, *stop*, *left*, *right*, *left_roll*, *right_roll*, *up_trim*, *down_trim*, *forward*, *back*, *left_step*, *right_step*, *up* и *down*. Данные два набора термов позволяют независимо изменять все шесть обобщённых координат МР.

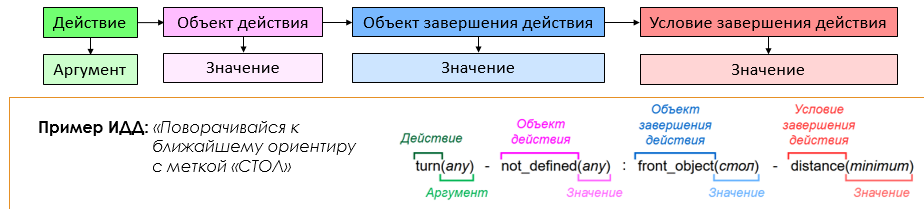


Рис. 3. Структура команды при описании ИДД на LRNB

Объект действия (фиолетовые блоки на рис. 3) обуславливает действие МР некоторым объектом (ориентиром), тогда как объект завершения действия (синие блоки на рисунке 3) определяет условие завершения ИДД, также обусловленное некоторым объектом (ориентиром). Всего введено семь термов, задающих объект действия и/или объект завершения действия: *not_defined*, *front_object*, *left_object*, *right_object*, *back_object*, *up_object* и *bottom_object*. При этом значения параметров могут быть трёх типов: *any*, *no_object* либо относительный идентификатор. При заданном значении *no_object*, в качестве объекта действия (либо завершения действия) выбирается отсутствие ориентира.

Необходимо указать на допустимость использования в LRNB логических операций AND, OR и NOT для четвёртой (а также второй и шестой) лексем. С учётом этого утверждается возможность как полностью задать положение объекта действия (завершения действия) относительно МР, так и сам объект действия (завершения действия), либо их комбинации.

Все условия завершения действия (красные блоки на рис. 3) можно разделить на две группы: условия, которые релевантны только если задан объект завершения действия, и условия, которые могут быть заданы независимо от наличия объекта завершения действия. Представляется необходимым пояснить случай, когда одновременно заданы и объект завершения действия, и условие завершения действия. В таком варианте обработка условия завершения действия происходит лишь в случае фиксации объекта завершения действия. Перечислим все введённые к настоящему моменту условия завершения действия: *not_defined* (0; условие завершения действия не задано), *number* (натуральное число; номер), *distance* (действительное число, *minimum*; дистанция), *jump_from* (действительное число; резкое увеличение измеренной дистанции), *jump_to* (действительное число; резкое уменьшение измеренной дистанции), *path* (действительное число; путь), *angle* (действительное число; угол), *time* (действительное число; время) и *special_event* (булева переменная; специальное событие). В скобках, перед описанием, приведены возможные значения условий завершения действия.

Очевидно, что при всём многообразии МР и сенсоров, которыми они могут быть оснащены, любой набор термов, отвечающий условию завершения действия, будет не полным. С целью обхода указанной трудности в список термов последней пары лексем авторами введён терм «*special_event*», который может принимать значения *True*, либо *False*. Предполагается, что при невозможности описать какое-либо условие завершения действия при помощи термов, представленных в предыдущем абзаце (например, превышение радиационным фоном некоторого порогового значения), данное событие может быть описано с использованием указанного терма.

Как было указано ранее, выходом ИДД на каждой итерации расчёта является одна из ТОП. В качестве простейшего примера (для гусеничного либо колёсного робота) можно предложить следующий набор выходов ИДД:

- ♦ *unknown*. Может возникнуть, например, когда ИДД не задано, или задано ошибочно. МР выполняет безусловную остановку;

- ◆ *left*. Безусловный танковый поворот налево;
- ◆ *right*. Безусловный танковый поворот направо;
- ◆ *forward*. Безусловное движение вперёд;
- ◆ *back*. Безусловное движение назад;
- ◆ *stop*. Безусловная остановка;
- ◆ *completed*. Специальная команда, сигнализирующая о завершении ИДД. МР выполняет безусловную остановку.

Отдельно приведём один из возможных примеров, приводящих к выходу ИДД «*unknown*». Предположим, нам необходимо описать следующее поведение робота на языке LRNB: «Стои на пляже, пока температура воздуха не превысит 40 градусов Цельсия». На языке LRNB такое поведение можно задать командой: *wait (stop) bottom_object (beach) not_defined (any) special_event (True)*. Предположим, что в момент поступления данной команды МР не идентифицирует ориентир с меткой «*beach*» под собой. В таком случае, поскольку оператор *wait* запрещает любые перемещения и повороты, принимается решение о невозможности выполнить данную команду с возвращением значения «*unknown*».

Кроме того, данный пример поясняет присутствие среди условий завершения действия термина «*special_event*». Поскольку в списке термов для условия завершения действия не предусмотрена температура, то при необходимости дать возможность описывать указанное в примере поведение, разработчик может либо дополнить список, добавив новый терм, например, «*temperature*», либо использовать терм «*special_event*», реализованный соответствующим образом.

Проведение эксперимента в эмуляции и на мобильном роботе. На данном этапе выполнения работы эксперименты проводились при упрощённых постановках. Для проведения экспериментов был разработан специальный эмулятор, позволяющий задавать сцену, расположенные на ней ориентиры, сенсоры (видеокамеры и дальномеры). Робот в разработанном эмуляторе моделировался в качестве материальной точки, измерения данных сенсорами и отработка команд роботом происходили без погрешностей. Кроме того, построение когнитивной карты (рис. 4,б) производилось не по реальному изображению сцены сверху, а в специально предусмотренном в эмуляторе конструкторе сцен.

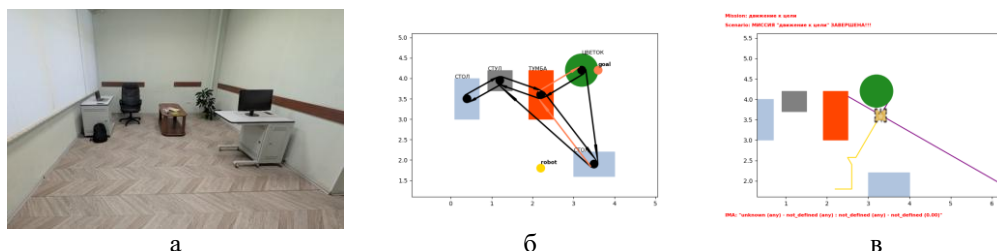


Рис. 4. Проведение экспериментов в эмуляторе: а – реальная сцена; б – построенная по ней когнитивная карта; в – выполнение миссии МР

На рис. 4,а представлена сцена, на которой проводились эксперименты как в эмуляторе, так и на реальном роботе. На рис. 4,б, представлена когнитивная карта, построенная для данной сцены, причём цветными прямоугольниками и окружностями обозначены ориентиры; чёрными окружностями – узлы графа; стрелками – рёбра графов; оранжевым отмечены рёбра, соответствующие построенному маршруту. На рис. 4,в представлен результат выполнения роботом миссии «*go_to_goal*» – движение к цели. Как видно из рисунка, при эмуляции миссия робота была выполнена.

Как было указано выше, маршрут МР, при использовании предложенного авторами подхода, сводится к фиксированному набору ИДД. Автоматически сгенерированный набор ИДД на формальном языке LRNB для данной сцены представлен на рис. 5,а.

Перед тем как приступить к полноценным экспериментам с МР, необходимо было проверить, что реализованные в эмуляторы алгоритмы выполнения ИДД в упрощённых постановках подходят для использования на МР. Поэтому на приведённом в настоящем подразделе эксперименте движение робота осуществлялось без обратной связи, т.е. по заранее записанному в эмуляторе набору команд.

В качестве МР использовался лабораторный гусеничный робот, собранный в ЦНИИ РТК. Как видно из рис. 5,б–г, при эксперименте с МР при упрощённой постановке задачи миссия «go_to_goal» также была выполнена.



Рис. 5. Выполнение роботом сценария «go_to_goal»: а – маршрут на LRNB; б – движение к ориентиру «СТОЛ»; в – движение к ориентиру «ТУМБА»; г – движение к ориентиру «ЦВЕТОК»

Проведение полноценных экспериментов с МР является предметом исследований авторов в настоящее время. Результаты этих исследований будут представлены в следующих работах авторов. Для осуществления обратной связи планируется использовать четыре видеокamеры, обеспечивающие круговой обзор, а также механический RPLidar. Для критически важных для интерпретирующей навигации задач распознавания и сопровождения отдельных ориентиров предполагается использовать известные сторонние решения (например, YOLO [19], DeepSORT [20] и т.д.).

Заключение. В статье представлены результаты работы в рамках решения авторами задачи интерпретирующей навигации на основе когнитивного представления пространства. Данный подход основывается на построении когнитивной карты по естественным ориентирам при невозможности локализации мобильного робота в мировой системе координат. Это особенно актуально в задачах, подразумевающих функционирование робота в условиях радиомолчания, помех и отсутствия данных спутниковых и навигационных систем.

В качестве одного из способов, в статье рассматривается построение когнитивной карты по семантически сегментированному изображению. В качестве основного недостатка такого подхода указана необходимость гарантировать тождественность идентификации ориентиров при их классификации как на изображении «сверху», так и на борту мобильного робота. Тем не менее, данный подход можно считать оптимальным, если нам заранее доступен план сцены.

С целью формализации навигационного поведения мобильных роботов, авторами статьи предложен формальный язык LRNB, который позволит описывать сложные миссии и сценарии, задавать условия завершения действия, характер движения агента в зависимости от объектов (в т.ч. динамических), их взаимного расположения и характеристик.

По мнению авторов, полученные результаты показывают потенциальную эффективность предложенного подхода к решению навигационных задач мобильными роботами. Намечены пути продолжения этих исследований, направленные на проведение полномасштабных экспериментов на реальных мобильных роботах как в закрытых помещениях различного назначения, так и на открытых сценах.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России №075-00558-26-00 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. Спасский Б.А. К вопросу об автономной навигации сельскохозяйственных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2025. – Т. 13, № 2. – С. 85-90.
2. Станкевич Л.А. Когнитивные поведенческие системы // XIX Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2017»: Лекции по нейроинформатике. – 2017. – С. 31-97.
3. Лопота А.В., Бахшиев А.В., Горюнов В.В., Плавинский М.Н., Смирнова Е.Ю. Перспективы применения интерпретирующей навигации и комплексирования в системах управления мобильными роботами // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2014. – № 11-12 (77-78). – С. 104-110.
4. Степанов Д.Н., Смирнова Е.Ю., Горюнов В.В. Когнитивная навигация мобильных роботов с использованием естественных визуальных ориентиров // Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – Т. 10, № 1. – С. 62-66.
5. Wang F. et al. Object-based reliable visual navigation for mobile robot // Sensors. – 2022. – Vol. 22, No. 6. – P. 2387.
6. Savinov N., Dosovitskiy A., Koltun V. Semi-parametric topological memory for navigation // ICLR. – 2018. – Vancouver, Canada, 2018.
7. Zhang T. et al. A neuromorphic algorithm for mapping, goal-learning, navigation, and patrolling // eLife. – 2024. – Vol. 12.
8. Villacorta-Atienza J.A., Makarov V.A. Neural Network Architecture for Cognitive Navigation in Dynamic Environments // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. – 2013. – Vol. 24, No. 12. – P. 2075-2087.
9. Babichev A., Cheng S., Dabaghian Y.A. Topological Schemas of Cognitive Maps and Spatial Learning // Frontiers in Computational Neuroscience. – 2016. – Vol. 10.
10. Chen K., Xiao J., Liu J., Tong Q., Zhang H., Liu R., Zhang J., Ajoudani A., Chen S. Semantic Visual Simultaneous Localization and Mapping // arXiv preprint arXiv: 2209.06428 [cs]. – arXiv. – 2025.
11. Lee Y.K., Eu K.S., Choy C.W. et al. Simultaneous Localization and Mapping with Basic Cognitive Understanding of Environments // 2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT). – Istanbul, Turkey: IEEE, 2020. – P. 1-6.
12. Liu Y., Petillot Y., Lane D., Wang S. Global Localization with Object-Level Semantics and Topology // 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – Canada: IEEE, 2019. – P. 4909-4915.
13. Sharma A., Dong W., Kaess M. Compositional and Scalable Object SLAM // 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – China: IEEE, 2021. – P. 11626-11632.
14. Chen K., Liu J., Chen Q., Wang Z., Zhang J. Accurate Object Association and Pose Updating for Semantic SLAM // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2022. – Vol. 23, No. 12. – P. 25169-25179.
15. Lobov S.A., Zharinov A.I., Makarov V.A., Kazantsev V.B. Spatial Memory in a Spiking Neural Network with Robot Embodiment // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 8.
16. Смирнова Е.Ю., Спасский Б.А. Организация супервизорного управления в сценариях экстремальной робототехники // Робототехника и техническая кибернетика. – 2020. – Т. 8, № 4. – С. 245-258.
17. Матвеев В.Д., Архипов А.Е., Фомин И.С. Разработка модели семантической сегментации RTC-SAM для определения препятствий на пути мобильного робота // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2025. – № 2 (244). – С. 212-220.
18. Add support for SAM3. – URL: <https://github.com/opengeos/segment-geospatial/pull/430> (дата обращения: 29.12.2025).
19. Hussain M. YOLO-v1 to YOLO-v8, the Rise of YOLO and Its Complementary Nature toward Digital Manufacturing and Industrial Defect Detection // Machines. – 2023. – Vol. 11, No. 7. – P. 677.
20. Du Y. et al. StrongSORT: Make DeepSORT Great Again // IEEE Transactions on Multimedia. – 2023. – Vol. 25. – P. 8725-8737.

REFERENCES

1. Spasskiy B.A. K voprosu ob avtonomnoy navigatsii sel'skokhozyaystvennykh robotov [On the issue of agricultural robots autonomous navigation], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2025, Vol. 13, No. 2, pp. 85-90.
2. Stankevich L.A. Kognitivnye povedencheskie sistemy [Cognitive behavioral systems], *XIX Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Neyroinformatika-2017»: Lektsii po neyroinformatike* [XIX International Scientific and Technical Conference "Neuroinformatics-2017": Lectures on neuroinformatics], 2017, pp. 31-97.
3. Lopota A.V., Bakhshiev A.V., Goryunov V.V., Plavinskiy M.N., Smirnova E.Yu. Perspektivy primeneniya interpretiruyushchey navigatsii i kompleksirovaniya v sistemakh upravleniya mobil'nymi robotami [Prospects for the application of interpretive navigation and integration in mobile robot control systems], *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Issues of Defense Technology. Series 16: Technical Means of Countering Terrorism], 2014, No. 11-12(77-78), pp. 104-110.
4. Stepanov D.N., Smirnova E.Yu., Goryunov V.V. Kognitivnaya navigatsiya mobil'nykh robotov s ispol'zovaniem estestvennykh vizual'nykh orientirov [Cognitive navigation of mobile robots using natural visual landmarks], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2016, Vol. 10, No. 1, pp. 62-66.
5. Wang F. et al. Object-based reliable visual navigation for mobile robot, *Sensors*, 2022, Vol. 22, No. 6, pp. 2387.
6. Savinov N., Dosovitskiy A., Koltun V. Semi-parametric topological memory for navigation, *ICLR*, 2018. Vancouver, Canada, 2018.
7. Zhang T. et al. A neuromorphic algorithm for mapping, goal-learning, navigation, and patrolling, *eLife*, 2024, Vol. 12.
8. Villacorta-Atienza J.A., Makarov V.A. Neural Network Architecture for Cognitive Navigation in Dynamic Environments, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2013, Vol. 24, No. 12, pp. 2075-2087.
9. Babichev A., Cheng S., Dabaghian Y.A. Topological Schemas of Cognitive Maps and Spatial Learning, *Frontiers in Computational Neuroscience*, 2016, Vol. 10.
10. Chen K., Xiao J., Liu J., Tong Q., Zhang H., Liu R., Zhang J., Ajoudani A., Chen S. Semantic Visual Simultaneous Localization and Mapping, *arXiv preprint arXiv: 2209.06428 [cs]*. arXiv, 2025.
11. Lee Y.K., Eu K.S., Choy C.W. et al. Simultaneous Localization and Mapping with Basic Cognitive Understanding of Environments, *2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*. Istanbul, Turkey: IEEE, 2020, pp. 1-6.
12. Liu Y., Petillot Y., Lane D., Wang S. Global Localization with Object-Level Semantics and Topology, *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Canada: IEEE, 2019, pp. 4909-4915.
13. Sharma A., Dong W., Kaess M. Compositional and Scalable Object SLAM, *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. China: IEEE, 2021, pp. 11626-11632.
14. Chen K., Liu J., Chen Q., Wang Z., Zhang J. Accurate Object Association and Pose Updating for Semantic SLAM, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, Vol. 23, No. 12, pp. 25169-25179.
15. Lobov S.A., Zharinov A.I., Makarov V.A., Kazantsev V.B. Spatial Memory in a Spiking Neural Network with Robot Embodiment, *Sensors*, 2021, Vol. 21, No. 8.
16. Smirnova E.Yu., Spasskiy B.A. Organizatsiya supervizornogo upravleniya v stsenariyakh ekstremal'noy robototekhniki [Organization of supervisory control in extreme robotics scenarios], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2020, Vol. 8, No. 4, pp. 245-258.
17. Matveev V.D., Arkhipov A.E., Fomin I.S. Razrabotka modeli semanticheskoy segmentatsii RTC-SAM dlya opredeleniya prepyatstviy na puti mobil'nogo robota [Development of the RTC-SAM semantic segmentation model for identifying obstacles in the path of a mobile robot], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2025, No. 2 (244), pp. 212-220.
18. Add support for SAM3. Available at: <https://github.com/opengeos/segment-geospatial/pull/430> (accessed 29 December 2025).
19. Hussain M. YOLO-v1 to YOLO-v8, the Rise of YOLO and Its Complementary Nature toward Digital Manufacturing and Industrial Defect Detection, *Machines*, 2023, Vol. 11, No. 7, pp. 677.
20. Du Y. et al. StrongSORT: Make DeepSORT Great Again, *IEEE Transactions on Multimedia*, 2023, Vol. 25, pp. 8725-8737.

Корсаков Антон Михайлович – Государственный научный центр РФ – Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»; e-mail: a.korsakov@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125523351; к.т.н.; с.н.с.

Иванова Виктория Владимировна – Государственный научный центр РФ – Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»; e-mail: v.ivanova@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125523351; инженер.

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

УДК 007:621.865.8

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-232-240

В.П. Носков, О.П. Гойдин, А.Н. Курьянов**ГРУППОВАЯ ВИДЕОНАВИГАЦИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ РОБОТОВ**

Работа посвящена решению актуальных задач совместной автономной видеонавигации беспилотных летательных аппаратов и наземных роботов в урбанизированных средах, включающих плотную городскую застройку и здания, а также в условиях пересеченной местности, включая горную и лесистую местность, где также, как в урбанизированных средах, применение традиционных средств дистанционного управления и навигации может быть ограничено наличием экранированных зон. Задачи групповой навигации предлагается решать на основе данных бортовой системы 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 и алгоритмы обработки данных бортовой системы технического зрения, состоящей из комплекса взаимно-юстированных лидара, телекамеры и тепловизора, формирующих геометрию окружающего пространства в виде облака точек с распределением на нем цветовых и температурных полей, позволяющих эффективно решать SLAM-задачу (определение текущих координат объекта управления с формированием геометрической модели внешней среды) и классификацию рабочей зоны по критериям геометрической и опорной проходимости, что обеспечивает автономные полет и движение роботов воздушного и наземного применения в урбанизированных средах и на пересеченной местности. Предлагается в качестве данных для организации автономного функционирования роботов воздушного и наземного применения, в том числе и в группе, использовать информационно-навигационное поле, представленное в виде графа видимости, позволяющего планировать безопасные кратчайшие траектории полета и движения, и множества опорных изображений, позволяющего корректно обрабатывать спланированные траектории с учетом ошибок решения видеонавигационной задачи. Такое информационно-навигационное поле позволяет представить в компактном виде необходимую и достаточную для автономного функционирования беспилотных летательных аппаратов и наземных роботов информацию и упрощает обмен ею между членами группы. Приведены результаты экспериментальных исследований в реальных условиях урбанизированной среды и пересеченной местности, подтверждающие эффективность предлагаемых методов, алгоритмов и соответствующих программно-аппаратных средств.

Гетерогенные роботы воздушного и наземного применения; комплексированная система технического зрения; видео-навигационная задача; информационно-навигационное поле; групповое управление.

V.P. Noskov, O.P. Goydin, A.N. Kuryanov**GROUP VIDEO NAVIGATION OF HETEROGENEOUS ROBOTS**

This paper addresses the pressing challenges of collaborative autonomous video navigation of unmanned aerial vehicles and ground robots in urban environments, including dense urban development and buildings, as well as in rugged terrain, including mountainous and wooded areas, where, as in urban environments, the use of traditional remote control and navigation tools may be limited by the presence of shielded areas. It is proposed to solve group navigation problems using data from an onboard vision system during operational reconnaissance of the work area by an unmanned aerial vehicle. The results ensure autonomous movement and flight of both individual heterogeneous robotic systems and in a group. The navigation algorithms are based on the methods and algorithms for processing data from the onboard vision system, consist-

ing of a complex of mutually adjusted lidar, television camera and thermal imager, which form the geometry of the surrounding space in the form of a point cloud with the distribution of color and temperature fields on it, allowing for the effective solution of the SLAM problem (determination of the current coordinates of the control object with the formation of a geometric model of the external environment) and the classification of the working area according to the criteria of geometric and support cross-country ability, which ensures autonomous flight and movement of robots for air and ground use in urbanized environments and on rough terrain. It is proposed to use an information and navigation field, represented as a visibility graph, to organize the autonomous operation of aerial and ground robots, including in a group, and a set of reference images, allowing for the correct execution of planned trajectories, taking into account errors in the video navigation task. This information and navigation field allows for the compact presentation of information necessary and sufficient for the autonomous operation of unmanned aerial vehicles and ground robots and facilitates its exchange between group members. The results of experimental studies in real-world conditions of urbanized environments and rugged terrain are presented, confirming the effectiveness of the proposed methods, algorithms, and corresponding software and hardware.

Heterogeneous aerial and ground robots; integrated machine vision system; video navigation task; information and navigation field; group control.

Введение. В урбанизированных средах, сильнопересеченной, горной и лесистой местности, где изобилуют экранированные зоны, затруднено использование традиционных средств спутниковой навигации и дистанционного управления. Такая же проблема возникает и при наличии радиопомех. В этом случае в последнее время для открытых пространств успешно применяются системы дистанционного управления с оптоволоконной связью. Однако и системы с оптоволоконной связью не всегда позволяют организовать движение и полет в урбанизированных средах (особенно в условиях плотной городской застройки и в зданиях) и в лесистой местности, а также имеют ограничения на дальность и возврат объекта управления.

При планировании практически всех операций в том числе и с использованием роботизированных средств на первое место выходит оперативность получения разведывательной информации. Перспективным здесь является применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). По сравнению с наземными робототехническими комплексами (РТК) БПЛА обладают более высокими скоростью передвижения и маневренностью, большей дальностью действия и обзора и могут свободно перемещаться в пространстве, благодаря чему появляется возможность преодоления завалов и препятствий типа тупиков и лабиринтов, посещения смежных участков обследуемой зоны через проёмы в потолке или стенах. Современные БПЛА специального и гражданского назначения оснащены в основном системами дистанционного управления, дополненными в некоторых случаях элементами автономности, ограничивающимися автопилотированием по заранее заданной траектории по данным спутниковой и инерциальной навигации в условиях свободной от препятствий зоны полёта. Даже кратковременная потеря связи с дистанционно-управляемыми БПЛА в условиях плотной городской застройки и в зданиях, а также сильнопересеченной, горной и лесистой местности практически гарантированно приводит к его потере. Традиционное автопилотирование здесь также невозможно из-за наличия множества препятствий в зоне полета, неустойчивой работы средств спутниковой навигации и недостаточной точности инерциальных систем навигации, то же самое можно сказать и о наземных РТК. Поэтому, несомненно, задачи повышения автономности РТК и БПЛА, ориентированных на использование в таких средах, в том числе и при их групповом применении, являются актуальными.

Центральными в рассматриваемом случае являются задачи формирования модели внешней среды и определения координат объектов управления по данным бортовых средств. Эффективное применение группы гетерогенных роботов (в рассматриваемом случае роботов наземного и воздушного применения) требует не только повышения уровня их автономности, но и нуждается в едином информационно-навигационном поле для организации совместного выполнения общей задачи. Единое информационно-навигационное поле, содержащее обобщенную модель внешней среды и координаты членов группы, позволяет планировать и отрабатывать согласованные в пространстве и времени траектории движения и полета, что и обеспечивает на практическом уровне реализацию автономного группового управления.

Наиболее востребованным сценарием группового управления роботов воздушного и наземного применения является использование автономного разведывательного БПЛА для формирования информационно-навигационного поля, обеспечивающего автономное планирование и обработку траекторий полета БПЛА, и движения РТК, способных, в отличие от БПЛА, нести и применять более тяжелое и энергоемкое бортовое оборудование (средства пожаротушения, взятия проб, дезактивации вредных веществ и т.д.) [1, 2]. Кроме того, автономный разведывательный БПЛА может формировать и план зоны интереса или визуально-подобную модель внешней среды [3], которые могут быть использованы для повышения ситуационной осведомленности операторов роботизированных средств и планирования действий живой силы, возможно совместно с РТК.

Видеонавигация в индустриально-городской среде. В условиях урбанизированных сред могут быть успешно использованы методы выделения из объемного облака точек, формируемого бортовым лидаром БПЛА (рис. 1), горизонтальной опорной поверхности P , которая практически всегда присутствует в таких средах (индустриальные территории, полы в зданиях, дороги и тротуары в городской застройке, ...) и опорных горизонтальных сечений (2D-изображений) внешней среды, сформированных на высоте h ($G_1(h)$, $G_2(h)$), позволяющих с высокой точностью и быстродействием определять все шесть координат БПЛА [1, 2].

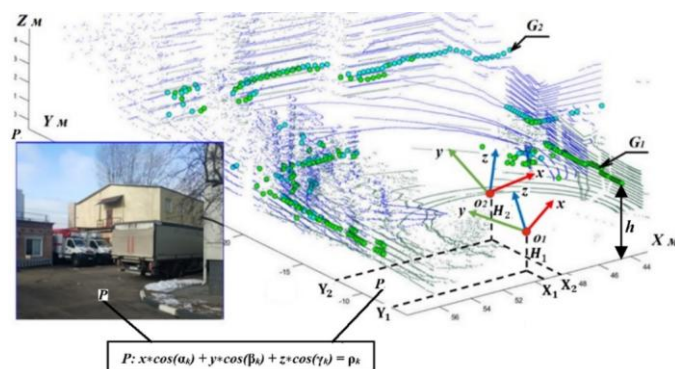


Рис. 1. Видеонавигация БПЛА в индустриально-городской среде

Объединение фрагментов горизонтальной опорной поверхности, выделяемой в процессе полета, позволяет построить план рабочей зоны для РТК (рис. 2), а множество опорных горизонтальных 2D-изображений с координатами их формирования – обеспечить его автономную навигацию [1, 2]. На рис. 2. для условий плотной городской застройки приведен сформированный по данным СТЗ БПЛА план рабочей зоны РТК с опорными изображениями (ОИ). В процессе движения РТК (а также полета БПЛА) накапливается ошибка решения навигационной задачи. Для приведения ее в соответствие с построенной ранее моделью внешней среды при попадании объекта управления в зону опорного изображения текущие координаты определяются не по предыдущему изображению, а по опорному, что обеспечивает корректную обработку спланированной в данной модели траектории.

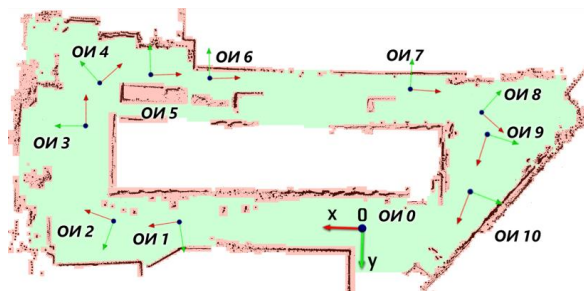


Рис. 2. План рабочей зоны РТК с опорными изображениями

В случае возникновения сложностей при выделении горизонтальной опорной поверхности (например, при полете БПЛА над лестницами и аппаратами или движении РТК по ним) полную задачу видеонавигации (определение всех 6-и координат объекта управления) можно решать с помощью алгоритмов, использующих как правило имеющиеся в урбанизированной среде плоские объекты (стены, потолки, полы, тротуары, ...), которые достаточно просто выделяются из облаков точек [4–8]. Для решения полной навигационной задачи необходимо выделять не менее 3-х взаимно не параллельных плоских объектов [9]. Если выделяется менее 3-х плоских объектов, то необходимо использовать их текстуру [10], которая может быть получена по данным телекамеры, юстированной с лидаром [3]. Результат решения SLAM-задачи с использованием выделяемых в процессе полета внутри здания текстурированных плоских объектов (стен и пола) приведен на рис. 3.

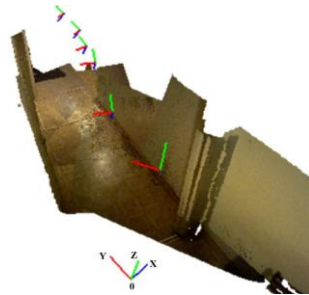


Рис. 3. Результат решения SLAM-задачи при выделении текстурированных плоских объектов из снятых в процессе полета семи комплексированных изображений

Видеонавигация на пересеченной местности. Навигация и управление БПЛА при полете над пересеченной местностью при отсутствии экранированных зон и радиоэлектронных помех может выполняться традиционными средствами (дистанционное управление с использованием средств спутниковой и инерциальной навигации).

В экранированных зонах пересеченной местности и урбанизированной среде, где невозможно выделить горизонтальную опорную поверхность (например, в урбанизированной среде, подвергшейся разрушениям), а также при наличии радиоэлектронных помех, навигация и управление также может выполняться на основе данных бортовых СТЗ [2]. В этом случае необходимо использовать лидар или комплексированную СТЗ, состоящую из взаимно-юстированных лидара и телекамеры [3], формирующую раскрашенное облако точек подстилающей поверхности. При использовании только данных лидара решение задач навигации и построение геометрической модели может быть выполнено с помощью алгоритма экстремальной навигации [11–15] (рис. 4).

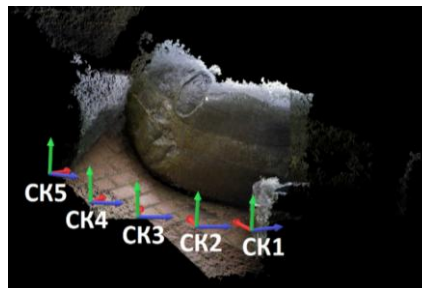


Рис. 4. Решение SLAM-задачи на пересеченной местности с использованием алгоритма экстремальной навигации по последовательности из пяти 3D-изображений

При использовании данных комплексированной СТЗ решение задач навигации и построение геометрической модели может быть выполнено с меньшими вычислительными затратами с помощью аппарата комплексированных (видео-дальнометрических) дескрипторов [16] (рис. 5).

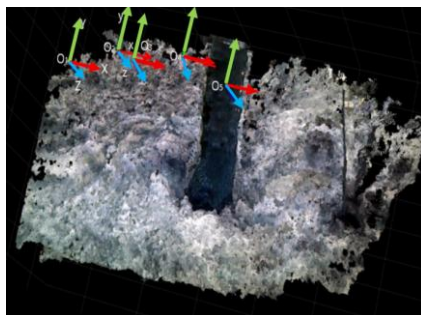
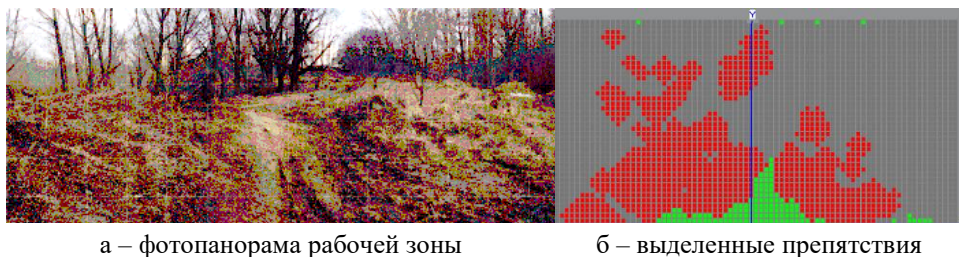


Рис. 5. Решение SLAM-задачи на пересеченной местности с использованием аппарата комплексированных дескрипторов по последовательности из пяти комплексированных изображений

В условиях пересеченной местности и в урбанизированной среде, подвергшейся разрушениям, для построения плана рабочей зоны РТК по видеоданным БПЛА необходимо классифицировать участки зоны маневрирования РТК на проходимые и непроходимые (распознавать препятствия) с учетом геометрических и опорных характер грунта, а также характеристик движителя данного РТК.

Для классификации рабочей зоны РТК по критерию геометрической проходимости необходимо выделять геометрические препятствия – критические для данного РТК перепады высот между соседними участками, которые могут быть вычислены по данным лидара БПЛА – облаку точек, приведенному к местной вертикали [17]. На рис. 6. Приведен результат классификации рабочей зоны по критерию геометрической проходимости.

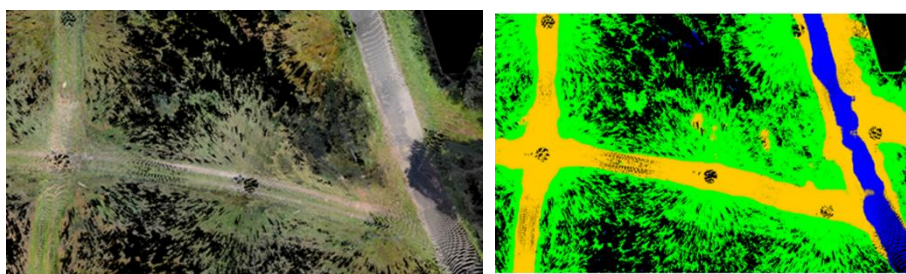


а – фотопанорама рабочей зоны

б – выделенные препятствия

Рис. 6. Классификация рабочей зоны по критерию геометрической проходимости

Для классификации рабочей зоны РТК по критерию опорной проходимости необходимо дополнить данные бортового лидара БПЛА данными юстированными с ним цветной телекамеры и тепловизора, что обеспечивает уверенное распознавание типов грунтов подстилающей поверхности и определить несущие характеристики участков рабочей зоны [18]. На рис. 7. приведен результат распознавания типов грунтов рабочей зоны по данным комплексированной СТЗ БПЛА.



а – видеоизображение местности

б – результат сегментации

Рис. 7. Сегментированные по типу грунта участки внешней среды

Знание типов грунтов позволяет по справочным данным выделить непроходимые участки для данного РТК [19].

Создание информационно-навигационного поля. Решение SLAM-задачи автономным БПЛА позволяет создать информационно-навигационное поле, обеспечивающее групповое функционирование рассматриваемых роботов воздушного и наземного применения. В частности, для урбанизированной среды создание информационно-навигационного поля будет заключаться в следующем [2]:

1. По сформированной объемной геометрической модели рабочей зоны для нужной высоты полета H строится граф видимости [20], обеспечивающий планирование кратчайших траекторий полета в данной рабочей зоне на данной высоте (рис. 8).

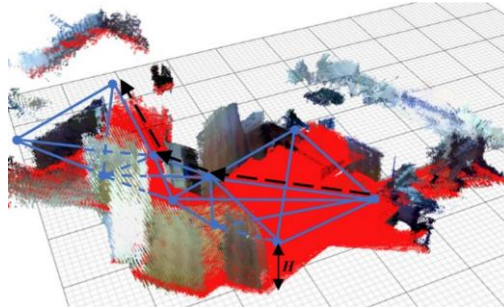


Рис. 8. Граф видимости и спланированная траектория полета на высоте H

2. Для сформированного плана рабочей зоны РТК строится граф видимости, обеспечивающий планирование кратчайших траекторий на разрешенных для движения участка опорной горизонтальной поверхности (рис. 9).

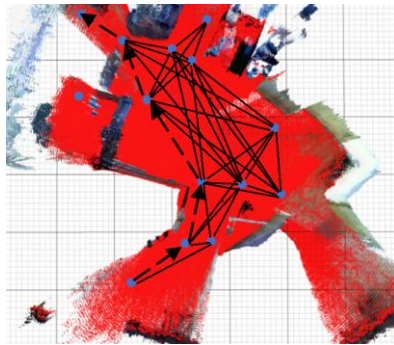


Рис. 9. Граф видимости и спланированная траектория движения РТК

3. Построенные графы видимости дополняются опорными горизонтальными 2D-изображениями с координатами их формирования (рис. 10), что позволяет корректно отрабатывать спланированные траектории с учетом ошибок решения навигационной задачи при формировании БПЛА объемной геометрической модели и плоского плана рабочей зоны РТК.

В матрице смежности графа видимости приводятся координаты вершин в рабочей зоне (X_i, Y_i) и длины ребер (l_{ij}) (рис. 10,а). Графы видимости для БПЛА и РТК могут не совпадать, так как геометрия внешней среды на высоте полета H может не совпадать с геометрией на плоскости перемещения РТК. Таблица опорных 2D-изображений для БПЛА и РТК одна и та же. При этом каждое опорное изображение $G_k(h)$ достаточно пометать только тремя координатами их получения $\langle X_k, Y_k, \phi_k \rangle$ (две горизонтальные и курс), остальные координаты (высота полета, крен, тангаж) для БПЛА вычисляются без накопления ошибки из выделенной горизонтальной плоскости P (см. рис. 1), а для РТК при движении по горизонтальной опорной поверхности они всегда равны нулю.

The diagram shows a 10x10 grid representing a matrix. The top row is labeled q , Y , q_i , q_j . The first column is labeled X , X_i , X_j . A dashed diagonal line runs from the top-left to the bottom-right. The cell at row i , column j contains Y_i , l_{ij} .

$\mathcal{N}_2$	X	Y	φ	$G(h)$
k	X_k	Y_k	φ_k	$G_k(h)$

а – матрица смежности графа видимости б – таблица опорных изображений

Рис. 10. Информационно-навигационное поле

Заключение. Рассмотренные выше методы и алгоритмы видеонавигации необходимо использовать в комплексе, что позволит обеспечить автономное функционирование БПЛА и РТК, в том числе и групповое, во всех средах. Описание геометрии рабочей зоны графом видимости обеспечивает нахождение кратчайших безопасных траекторий полета БПЛА и движения РТК, а использование опорных изображений с координатами из получения – корректную обработку спланированных траекторий с учетом ошибок решения навигационной задачи. Таким образом, формирование информационно-навигационного поля в виде графа видимости с множеством опорных изображений с координатами их получения позволяет представить в компактном виде необходимую и достаточную для автономного функционирования БПЛА и РТК информацию и упрощает обмен ею между членами группы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Носков В.П., Баричев Ю.С., Гойдин О.П., Курьянов А.Н. Разработка и исследование средств видео-дальнометрической навигации роботов воздушного и наземного применения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2025. – № 2. – С. 96-108.
2. Носков В.П. Видеонавигация автономных роботов: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025. – 230 с.
3. Носков В.П., Рубцов И.В., Романов А.Ю. Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видеокамеры и дальнометра // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 8. – С. 2-5.
4. Носков В.П., Киселев И.О. Трехмерный вариант метода Хафа в реконструкции внешней среды и навигации // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – № 8. – С. 552-560.
5. Носков В.П., Киселев И.О. Выделение плоских объектов в линейно структурированных 3D-изображениях // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – № 2 (19). – С. 31-38.
6. Konouchine A., Gaganov V., Veznevets V. AMLESAC: A new maximum likelihood robust estimator // Proc. Graphicon. – 2005. – Vol. 5. – P. 93-100.
7. Klasing K. et al. Comparison of surface normal estimation methods for range sensing applications // Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on. – IEEE, 2009. – P. 3206-3211.
8. Holz D. et al. Real-time plane segmentation using RGB-D cameras // Robot Soccer World Cup. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. – P. 306-317.
9. 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.
10. 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.
11. Носков В.П., Губернаторов Д.В. Экстремальная навигация по 3D-изображениям в мобильной робототехнике // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2021. – Т. 22, № 11. – С. 594-600.
12. Zhang, Zhengyou. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces // International Journal of Computer Vision. – 1994. – 13 (12). – P. 119-152.

13. Nüchter A., Lingemann K., Hertzberg J., Surmann H. 6D SLAM - 3D Mapping Outdoor Environments // *Journal of Field Robotics*. – September 2007. – Vol. 24, No. 8-9. – P. 699-722.
14. Segal A., Haehnel D., Thrun S. Generalized-ICP // *Proc. of Robotics: Science and Systems, RSS*. – 2009.
15. Pomerleau F., Colas F., Siegwart R., Magnenat S. Comparing ICP Variants on Real-World Data Sets // *Autonomous Robots*. – April 2013. – Vol. 34, No. 3. – P. 133-148.
16. Носков В.П., Курьянов А.Н. Использование комплексированных дескрипторов в решении SLAM-задачи // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2022. – № 1. – С. 268-278.
17. Буйолов Г.А., Носков В.П., Руренко А.А., Распопин А.Н. Аппаратно-алгоритмические средства формирования модели проблемной среды в условиях пересеченной местности // *Сб. научных трудов «Управление движением и техническое зрение автономных транспортных роботов»*. – М.: ИФТП, 1989. – С. 61-69.
18. Вазаев А.В., Носков В.П., Рубцов И.В., Цариченко С.Г. Распознавание объектов и типов опорной поверхности по данным комплексированной системы технического зрения // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2016. – № 2 (175). – С. 127-139.
19. Вазаев А.В., Маишков К.Ю., Носков В.П., Рубцов И.В. Классификация зоны маневрирования РТК на основе тактильной и зрительной информации // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2021. – № 1. – С. 6-19.
20. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graf // *Numerische Mathematik*. – 1959. – Vol. 1, Iss. 1. – P. 269-271. – ISSN 0029-590X. 0945-3245. – doi 10.1007/BF01386390.

REFERENCES

1. Noskov V.P., Barichev Yu.S., Goydin O.P., Kur'yanov A.N. Razrabotka i issledovanie sredstv videodal'nometricheskoy navigatsii robotov vozdušnogo i nazemnogo primeneniya [Development and study of video-range-metric navigation tools for air and ground robots], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2025, No. 2, pp. 96-108.
2. Noskov V.P. Videonavigatsiya avtonomnykh robotov: ucheb. posobie [Video navigation of autonomous robots: a tutorial]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2025, 230 p.
3. Noskov V.P., Rubtsov I.V., Romanov A.Yu. Formirovanie ob"edinennoy modeli vneshney sredy na osnove informatsii videokamery i dal'nometra [Formation of a combined model of the external environment based on the information from a video camera and a rangefinder], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2007, No. 8, pp. 2-5.
4. 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.
5. 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.
6. Konouchine A., Gaganov V., Veznevets V. AMLESAC: A new maximum likelihood robust estimator, *Proc. Graphicon*, 2005, Vol. 5, pp. 93-100.
7. Klasing K. et al. Comparison of surface normal estimation methods for range sensing applications, *Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on*. IEEE, 2009, pp. 3206-3211.
8. Holz D. et al. Real-time plane segmentation using RGB-D cameras, *Robot Soccer World Cup*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, pp. 306-317.
9. Kaz'min V.N., Noskov V.P. Vydelenie geometricheskikh i semanticheskikh ob"ektov v dal'nometricheskikh izobrazheniyakh dlya navigatsii robotov i rekonstruktsii vneshney sredy [Extraction of geometric and semantic objects in ranging images for robot navigation and environmental reconstruction], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 10 (171), pp. 71-83.
10. 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 construct a model of the external environment and navigation], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2019, No. 8, pp. 490-497.
11. Noskov V.P., Gubernatorov D.V. Ekstremalnaya navigatsiya po 3D-izobrazheniyam v mobil'noy robototekhnike [Extreme navigation based on 3D images in mobile robotics], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2021, Vol. 22, No. 11, pp. 594-600.
12. Zhang, Zhengyou. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces, *International Journal of Computer Vision*, 1994, 13 (12), pp. 119-152.

13. Nüchter A., Lingemann K., Hertzberg J., Surmann H. 6D SLAM - 3D Mapping Outdoor Environments, *Journal of Field Robotics*, September 2007, Vol. 24, No. 8-9, pp. 699-722.
14. Segal, A., Haehnel, D., Thrun, S. Generalized-ICP, *Proc. of Robotics: Science and Systems, RSS*, 2009.
15. Pomerleau F., Colas F., Siegwart R., Magnenat S. Comparing ICP Variants on Real-World Data Sets, *Autonomous Robots*, April 2013, Vol. 34, No. 3, pp. 133-148.
16. Noskov V.P., Kur'yanov A.N. Ispol'zovanie kompleksirovannykh deskriptorov v reshenii SLAM-zadachi [Using complexed descriptors in solving the SLAM problem], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1, pp. 268-278.
17. Buyvolov G.A., Noskov V.P., Rurenko A.A., Raspopin A.N. Apparato-algoritmicheskie sredstva formirovaniya modeli problemnoy sredy v usloviyakh peresechennoy mestnosti [Hardware and Algorithmic Means for Forming a Model of a Problem Environment in Rough Terrain Conditions], *Sb. nauchnykh trudov «Upravlenie dvizheniem i tekhnicheskoe zrenie avtonomnykh transportnykh robotov»* [Collection of scientific papers "Motion Control and Technical Vision of Autonomous Transport Robots"]. Moscow: IFTP, 1989, pp. 61-69.
18. Vazaev A.V., Noskov V.P., Rubtsov I.V., Tsarichenko S.G. Raspoznavanie ob"ektov i tipov opornoy poverkhnosti po dannym kompleksirovannoy sistemy tekhnicheskogo zreniya [Recognition of objects and types of supporting surfaces based on data from an integrated machine vision system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 2 (175), pp. 127-139.
19. Vazaev A.V., Mashkov K.Yu., Noskov V.P., Rubtsov I.V. Klassifikatsiya zony manevrirovaniya RTK na osnove taktil'noy i zritel'noy informatsii [Classification of the maneuvering zone of the robotic complex based on tactile and visual information], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. № 1, pp. 6-19.
20. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graf, *Numerische Mathematik*, 1959, Vol. 1, Iss. 1, pp. 269-271. ISSN 0029-590X. 0945-3245. doi 10.1007/BF01386390.

Носков Владимир Петрович – Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова; e-mail: noskov_mstu@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79166766057; к.т.н.; главный специалист научно-исследовательской лаборатории; зав. сектором, НИИ Специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Гойдин Олег Петрович – Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова; e-mail: crer@vniia.ru; г. Москва, Россия; руководитель центра робототехники и аварийного реагирования.

Курьянов Алексей Николаевич – Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова; e-mail: tigr-kur@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79258248138; инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории.

Noskov Vladimir Petrovich – All-Russian Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov; e-mail: noskov_mstu@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79166766057; cand. of eng. sc.; general expert of the research laboratory; Bauman Moscow State Technical University, Special robotics and mechatronics department, NIISM sector head.

Goydin Oleg Petrovich – All-Russian Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov; e-mail: crer@vniia.ru; Moscow, Russia; head of the Center for Robotics and Emergency Response.

Kuryanov Alexsei Nikolaevich – All-Russian Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov; e-mail: tigr-kur@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79258248138; research-engineer of the research laboratory.

Ф.М. Цеева, Н.Е. Арабов, А.М. Бозиева, З.В. Шомахов

ЭМУЛЯЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНЫХ ИК- И УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Актуальность исследования обусловлена растущей потребностью в безопасной валидации навигационных алгоритмов автономных мобильных роботов, функционирующих в загромождённых и динамически изменяющихся средах, где использование физического оборудования сопряжено с риском повреждений и высокими затратами. Цель работы – разработка строгой методологии программной эмуляции системы технического зрения на основе комплементарных виртуальных инфракрасных и ультразвуковых датчиков. Для достижения цели решены следующие задачи: формализация кинематической модели дифференциального привода с вектором состояния $[x, y, \theta]^T$; математическое описание нелинейной триангуляции ИК-датчиков и физики распространения ультразвука методом времени пролёта $d=c \cdot t/2$; интеграция аддитивных гауссовых шумов с параметрами $\sigma_{us}=0,005$ м, $\sigma_{ir}=0,002$ м; реализация слияния разнородных данных через UKF. В качестве навигационных контроллеров применены метод искусственных потенциальных полей с притягивающими и отталкивающими компонентами и нечёткие логические контроллеры. Экспериментальная проверка в Python-среде моделирования лабиринта со статическими препятствиями продемонстрировала среднюю ошибку позиционирования 0,2 м в сферических конфигурациях и точность обнаружения препятствий 89,61%. Новизна предложенного подхода заключается в обеспечении детерминированной связи между теоретическим планированием траектории и физической реализацией за счёт синергетического использования оптических и акустических сенсорных модальностей. Практическая значимость работы состоит в существенном сокращении времени разработки и тестирования интеллектуальных робототехнических систем благодаря возможности предварительной отладки алгоритмов восприятия, слияния данных и навигации в контролируемых эмуляционных условиях без привлечения дорогостоящего аппаратного обеспечения.

Мобильный робот; система технического зрения; инфракрасные датчики; ультразвуковые датчики; эмуляция датчиков; слияние данных; искусственные потенциальные поля; фильтр Калмана; время пролёта; локальная навигация.

F.M. Tseeva, N.E. Arabov, A.M. Bozieva, Z.V. Shomakhov

EMULATION OF A TECHNICAL VISION SYSTEM BASED ON VIRTUAL IR AND ULTRASONIC SENSORS FOR MOBILE ROBOT NAVIGATION

The relevance of this research is driven by the growing need for safe validation of navigation algorithms for autonomous mobile robots operating in cluttered and dynamically changing environments, where the use of physical equipment entails risks of damage and high costs. The aim of the work is to develop a rigorous methodology for software emulation of a technical vision system based on complementary virtual infrared and ultrasonic sensors. To achieve this aim, the following tasks were solved: formalization of the kinematic model of a differential drive with a state vector $[x, y, \theta]^T$; mathematical description of nonlinear triangulation for IR sensors and the physics of ultrasound propagation using the time-of-flight method $d = c \cdot t/2$; integration of additive Gaussian noises with parameters $\sigma_{us} = 0.005$ m, $\sigma_{ir} = 0.002$ m; implementation of heterogeneous data fusion using an Unscented Kalman Filter. The navigation controllers employed were the artificial potential field method with attractive and repulsive components, and fuzzy logic controllers. Experimental validation in a Python simulation environment of a maze with static obstacles demonstrated an average positioning error of 0.2 m in spherical configurations and an obstacle detection accuracy of 89.61%. The novelty of the proposed approach lies in providing a deterministic link between theoretical trajectory planning and physical implementation through the synergistic use of optical and acoustic sensory modalities. The practical significance of the work consists in a substantial reduction in the development and testing time for intelligent robotic systems, owing to the possibility of preliminary debugging of perception, data fusion, and navigation algorithms in controlled emulation conditions without the need for expensive hardware.

Mobile robot; technical vision system; infrared sensors; ultrasonic sensors; sensor emulation; data fusion; artificial potential fields; Unscented Kalman Filter; Time-of-Flight; local navigation.

Введение. Растущая потребность в автономных робототехнических системах для задач ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, патрулирования и промышленной логистики требует навигационных решений, способных безопасно функционировать в загромождённых и динамически изменяющихся средах. Система технического зрения (СТЗ) выступает в качестве перцептивного ядра мобильного робота, формируя структурированное представление окружающего пространства. В современной робототехнике этап эмуляции является ключевым для валидации алгоритмов восприятия и навигации в контролируемых условиях [1–4]. В данной работе используются комплементарные оптические и акустические сенсорные модальности, обеспечивающие плавную и безопасную навигацию между начальной и целевой точками при минимизации длины траектории и сохранении высокой надежности обхода препятствий.

Физические принципы инфракрасных и ультразвуковых датчиков. Методы навигации мобильных роботов традиционно подразделяются на глобальные и локальные. Глобальная навигация предполагает наличие априорной информации об окружающей среде и использует детерминированные алгоритмы, такие как Дейкстры или A^* . В отличие от этого, локальная навигация опирается на данные датчиков в реальном времени – в частности, инфракрасных и ультразвуковых – для постоянной корректировки движения робота и обхода непредвиденных препятствий. В последние годы была предложена концепция одновременной калибровки и навигации (SCAN), концептуально близкая к SLAM, но ориентированная на онлайн-калибровку ультразвуковых локальных систем позиционирования (ULPS) в процессе движения робота. Такой подход отражает общую тенденцию превращения недорогих сенсорных массивов в полноценные компоненты СТЗ за счет методов сенсорного слияния и фильтрации, таких как расширенный фильтр Калмана (EKF) [1, 5, 6]. На рис. 1 показана классификация методов навигации.

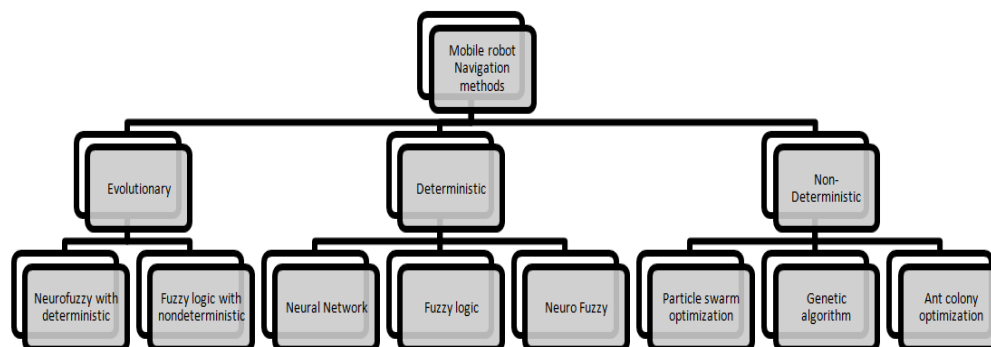


Рис. 1. Классификация методов навигации и планирования траектории мобильных роботов [7]

Ультразвуковые датчики функционируют на основе принципа измерения времени пролета (ToF), определяя интервал между излучением высокочастотного акустического импульса (обычно 40–42 кГц) и приёмом отражённого сигнала. Для высокоточной эмуляции необходимо учитывать, как сферический случай, при котором измеряются абсолютные расстояния, так и гиперболический случай, основанный на разностях расстояний до нескольких маяков [8]. Инфракрасные датчики, в свою очередь, обеспечивают высокочастотные измерения близости, однако характеризуются выраженной нелинейной зависимостью между напряжением и расстоянием. Корректная эмуляция также должна учитывать геометрию размещения датчиков, например квадратные конфигурации маяков с известной диагональю, обеспечивающие пространственную избыточность, необходимую для навигации.

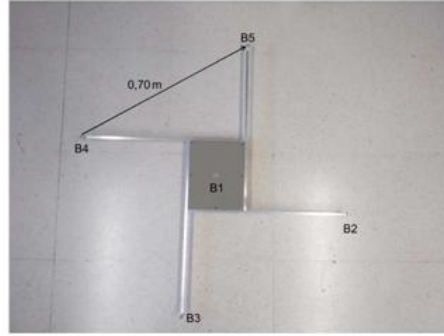


Рис. 2. Геометрия и расположение преобразователей ультразвукового узла позиционирования [9]

Математическая модель системы. В формализованной математической модели мобильного робота и виртуальных инфракрасных и ультразвуковых датчиков используются общепринятые кинематические модели мобильной робототехники и стандартные физические принципы работы сенсоров [1, 9, 10].

Для эмуляции системы технического зрения положение робота ξ_I должно быть определено в глобальной системе координат. Согласно модели дифференциального привода [11, 12]. Положение робота в глобальной системе координат описывается вектором состояния:

$$\xi_I = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где x, y – координаты центра робота, θ – угол ориентации относительно оси X .

Кинематическая модель дифференциального привода. Матрица поворота [11]:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Прямая кинематическая модель определяет скорость в глобальной системе координат:

$$\dot{\xi} = R(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{r\phi_1}{2} + \frac{r\phi_2}{2} \\ 0 \\ \frac{r\phi_1}{2l} - \frac{r\phi_2}{2l} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где r – радиус колеса, $2l$ – расстояние между колесами, ϕ_1 и ϕ_2 – угловые скорости колес.

Модель ультразвукового датчика. Расстояние определяется как:

$$d = \frac{c \cdot t}{2}. \quad (4)$$

где c – скорость звука, t – время пролета сигнала.

Модель измерения:

$$z_{us} = d_{true} + w_{us}, \quad (5)$$

где d_{true} – истинное расстояние до объекта, w_{us} – случайная погрешность.

Шум принимается нормально распределенным:

$$w_{us} \sim N(0, \sigma_{us}^2). \quad (6)$$

Такая стохастическая модель используется в задачах навигации мобильных роботов [11].

Абсолютная температура среды:

$$c = \sqrt{\gamma RT}. \quad (7)$$

Модель инфракрасного датчика. Инфракрасный датчик ближнего действия реализует принцип оптической триангуляции [11].

Геометрическая зависимость расстояния:

$$D = \frac{fL}{x}, \quad (8)$$

где f – фокусное расстояние, L – база между излучателем и приемником, x – координата светового пятна на фоточувствительном элементе.

С учетом погрешности измерение описывается как:

$$z_{ir} = D + w_{ir}, \quad (9)$$

где

$$w_{ir} \sim N(0, \sigma_{ir}^2).$$

Геометрическая модель расстояния. Пусть положение робота равно (x, y) , а препятствие описывается множеством точек Ω .

Истинное расстояние до препятствия вдоль направления излучения:

$$d_{true} = \min_{p \in \Omega} \|p - p_s\|, \quad (10)$$

где p_s – положение сенсора в глобальной системе координат.

Норма определяется как евклидова:

$$\|p - p_s\| = \sqrt{(x_p - x_s)^2 + (y_p - y_s)^2}. \quad (11)$$

Система уравнений позиционирования. Эмуляция позиционирования на основе маяков требует решения гиперболической системы нелинейных уравнений для n виртуальных маяков $B_i(x_i, y_i)$ [7]. Для представления двумерного положения и ориентации используется вектор состояния:

$$\hat{X}_{G,k} = [\hat{x}_{G,k} \quad \hat{y}_{G,k} \quad \hat{\theta}_{G,k}]^T. \quad (12)$$

Оценённое расстояние $\hat{d}$ между роботом и маяком i в виртуальной среде вычисляется по формуле:

$$\hat{d}_{P_{G,0}, B_{G,m,i}} = \sqrt{(\hat{x}_{G,0} - \hat{x}_{B,m,i})^2 + (\hat{y}_{G,0} - \hat{y}_{B,m,i})^2 + (z_{G,0} - \hat{z}_{B,m,i})^2} \quad (13)$$

Для высокоточной эмуляции необходимо задать следующие эвристические стандартные отклонения шума виртуальных датчиков:

- ◆ Приращение расстояния одометра: $\sigma \Delta d_{odo} = 0.03$ м.
- ◆ Приращение угла одометра: $\sigma \Delta \theta_{odo} = 0.02$ рад.
- ◆ Измерение ультразвуком: $\sigma_v = 0.005$ м.

При наличии нескольких измерений формируется система нелинейных уравнений:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d_i^2. \quad (14)$$

где (x_i, y_i) – координаты опорных точек, d_i – измеренные расстояния.

Вектор невязки:

$$f(\xi) = \begin{bmatrix} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 - d_1^2 \\ \vdots \\ (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 - d_n^2 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Оценка состояния может выполняться итерационным методом Гаусса–Ньютона:

$$\xi_{k+1} = \xi_k - (J^T J)^{-1} J^T f(\xi_k). \quad (16)$$

Полная модель включает кинематическую модель движения, геометрическую модель сцены, модели измерений ультразвуковых и инфракрасных датчиков и стохастическое описание погрешностей.

Эмуляция виртуальных датчиков основывается на математическом представлении наблюдений $Z_{T,o,k}$. Для ультразвуковых датчиков расстояние между роботом и виртуальными маяками вычисляется путём решения нелинейной системы уравнений методом Гаусса–Ньютона. Для обеспечения реалистичности в модель вводятся шумы, обычно описываемые как белый гауссов шум с нулевым средним и стандартными отклонениями по-

рядка $\sigma_{odo}=0,03$ м для одометрии и $\sigma_{us}=0,005$ м для ультразвуковых измерений. Эти параметры воспроизводят неопределенность, присущую физическим датчикам, и имеют критическое значение при тестировании навигационных алгоритмов мягких вычислений.

Для обеспечения физической достоверности вводится аддитивный белый гауссов шум (AWGN):

$$z_{us} = D_{true} + N(0, \sigma_{us}^2), \quad (17)$$

где $\sigma_{us}=0,005$ м; $\sigma_{odo}=0,03$ м [5].

СТЗ, основанная на инфракрасных и ультразвуковых датчиках, не ограничивается выдачей отдельных значений расстояний, а формирует более сложные представления окружающей среды, такие как карты достоверности или гистограммы векторного поля (VFH). Путём слияния данных от нескольких инфракрасных датчиков и ультразвуковых маяков создаётся вероятностная модель среды. В условиях эмуляции такое слияние обычно реализуется с использованием несмещённого сигма-точечного фильтра Калмана (UKF), которые обладают большей устойчивостью по сравнению с EKF при наличии нелинейностей и гауссовских шумов, характерных для сложных внутренних помещений.

Слияние датчиков для обновления системы технического зрения (TVS) описывается дискретными уравнениями процесса и измерения:

$$X_{T,k} = f(X_{T,k-1}, \Delta d_{odo,k}, \Delta \theta_{odo,k}) + W_T. \quad (18)$$

$$Z_{T,o,k} = h(X_{T,k}) + V_{T,o,k}.$$

При использовании UKF сигма-точки вычисляются как:

$$\chi_{T,(n),k,j} = \hat{X}_{T,(n),k-1} + \left(\sqrt{(L + \lambda) P_{T,(n),ka}^a} \right)_j. \quad (19)$$

Дополнительно система технического зрения может обрабатывать эмулированные данные ИК-датчиков через нейронную сеть. Согласно [13, 14], вход навигационной системы представляет собой матрицу размером 256×36 [1, 5, 15].

Выходные данные эмулированной СТЗ напрямую используются навигационными контроллерами робота. Наиболее распространёнными методами интеграции являются:

1. Метод искусственных потенциальных полей (APF): робот притягивается к целевой точке и одновременно отталкивается от препятствий, обнаруженных виртуальными датчиками.

Полная потенциальная функция:

$$U(q) = U_{att}(q) + U_{rep}(q). \quad (20)$$

Притягивающая сила:

$$F_{att}(q) = -\nabla U_{att} = k_{att}(q - q_{goal}). \quad (21)$$

Отталкивающая сила:

$$F_{rep}(q) = -\nabla U_{rep}(q) = \begin{cases} k_{rep} \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho^2(q)} \frac{q - q_{obs}}{\rho(q)}, & \text{если } \rho(q) \leq \rho_0 \\ 0, & \text{если } \rho(q) > \rho_0 \end{cases}. \quad (22)$$

2. Нечеткие логические контроллеры: измерения датчиков преобразуются в лингвистические переменные (например, «Близко», «Далеко»), что позволяет реализовать человекоподобную логику принятия решений при обходе препятствий и следовании вдоль контуров.

Для корректировки курса робота на основе эмулированных данных маяков вычисляется фазовая разность $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$. Она используется контроллером для обновления ориентации: $\theta_{new} = \theta_{old} + \Delta\theta$ [16].

Для реактивного обхода препятствий система технического зрения формирует отталкивающее потенциальное поле:

$$U_{rep}(q) = \frac{1}{2} k_{rep} \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \quad (23)$$

при условии $\rho(q) \leq \rho_0$ – расстояние до препятствия, измеренное эмулированными датчиками [11].

Сравнительные исследования показывают, что нечеткие контроллеры, как правило, обладают большей устойчивостью к шумам и неопределенности по сравнению с детерминированными методами [1–4].

Эмуляция позволяет безопасно исследовать классические проблемы локальных минимумов, при которых силы притяжения и отталкивания взаимно компенсируются, приводя к остановке робота. Вместе с тем основным ограничением является вычислительная сложность. С увеличением числа эмулируемых лучей, частиц или нейронных элементов производительность моделирования в реальном времени может снижаться. Сравнительный анализ, представленный в литературе, показывает, что нейросетевые методы обеспечивают высокую точность, однако требуют значительно больших вычислительных ресурсов по сравнению с системами на основе нечеткой логики [1, 3].

Эмуляция СТЗ широко используется для предварительной калибровки сервисных роботов перед их эксплуатацией. Применение методов обратной траектории, при которых движение робота воспроизводится в обратном направлении на основе сохранённых измерений, позволяет выполнять оффлайн-уточнение параметров датчиков и положений маяков. Подобные подходы широко применяются в образовательных симуляторах (например, платформы Pioneer-3DX) для обучения принципам сенсорной навигации без необходимости использования физического оборудования [1, 5].

Программная реализация и экспериментальные результаты. Для проверки предложенных математических моделей системы технического зрения (TVS) была разработана программная среда моделирования на языке Python. Среда моделирования воспроизводит сложный внутренний лабиринт со статическими препятствиями, где мобильный робот с дифференциальным приводом должен перемещаться от начального положения к целевой точке, используя только виртуальные датчики.

Эмуляция реализована внутри класса RobotTechnicalVision, который управляет внутренним состоянием робота $x_I = [x, y, \theta]$. Программная реализация строго соответствует кинематическим и физическим моделям, определённым в предыдущих разделах:

1. Кинематическое интегрирование: Метод move реализует прямую кинематику платформы с дифференциальным приводом. Используется дискретная интеграция Эйлера с шагом 0.15 секунды для обновления глобальных координат и ориентации робота.

2. Рейкаст-восприятие: Метод sense моделирует физический процесс восприятия. Он вычисляет пересечение виртуальных лучей с границами среды и стенами лабиринта. Для повышения физической достоверности в измерения добавляется аддитивный белый гауссов шум с использованием функции `pr.random.normal(0, σ)`. При этом стандартные отклонения составляют: σ для ультразвуковых датчиков равен 0.01 метра, σ для инфракрасных датчиков равен 0.002 метра.

3. Комплементарные сенсорные модальности: ультразвуковая система состоит из трёх датчиков дальнего действия с рабочей дальностью 4.5 метра. Датчики ориентированы под углами плюс тридцать градусов, минус тридцать градусов и ноль градусов относительно продольной оси робота.

Инфракрасная система состоит из четырёх датчиков ближнего действия с дальностью 1.0 метр, ориентированных через девяносто градусов: под углами ноль, девяносто, сто восемьдесят и двести семьдесят градусов.

Навигационный контроллер реализован как реактивная система градиентного спуска. Полный вектор силы F_{total} является суммой нескольких компонентов.

Коэффициент K_{ATT} формирует вектор притяжения к целевой позиции. Вектор нормируется для поддержания постоянной линейной скорости движения.

Коэффициент K_{REP} вычисляется по формуле искусственных потенциальных полей. Для датчиков обоих типов отталкивающая сила активируется, когда препятствие попадает в зону влияния радиуса ρ_0 . Используется зависимость, аналогичная закону обратных квадратов:

$$F_{rep} \text{ пропорциональна } \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{\rho_0} \right) \text{ умноженное на } \frac{1}{d^2},$$

где d – расстояние до препятствия.

Для предотвращения застревания в локальных минимумах, что является типичным ограничением классического метода APF, реализованы дополнительные стратегии:

- ♦ Тангенциальный поток K_{TAN} для инфракрасных датчиков, позволяющий двигаться вдоль поверхностей стен.
- ♦ Логика движения в сторону свободного пространства для ультразвуковых датчиков, которая отдаёт предпочтение открытым проходам.

Интеграция различных сенсорных модальностей в рамках системы технического зрения (СТЗ) требует разработки надежной архитектуры слияния данных, способной эффективно обрабатывать нелинейные сигналы и неопределенности внешней среды. В то время как традиционные фильтры (например, Калмана или частиц) обеспечивают надежную оценку состояния, использование искусственных нейронных сетей (ИНС) позволяет достичь превосходной генерализации при классификации сложных препятствий и принятии реактивных навигационных решений.

Как показано на рис. 3, обобщенная архитектура слияния данных предполагает параллельный сбор информации от нескольких виртуальных сенсоров (в нашем случае – массивов ИК и УЗ датчиков) с последующим этапом нормализации. Полученные сигналы подаются на вход нейросетевого уровня для формирования консолидированной оценки состояния или прямой навигационной команды. Данный структурный подход полностью соответствует методологии, предложенной в работе [17], где многослойный перцептрон (MLP) используется для обработки матрицы сенсорных данных размерностью 256×36 . Применение такой иерархической модели позволяет эмулируемой СТЗ перейти от анализа «сырых» дистанций к высокоуровневому пространственному восприятию, обеспечивая точность обнаружения объектов на уровне 89,61% в условиях загроможденного пространства [13, 17, 18]

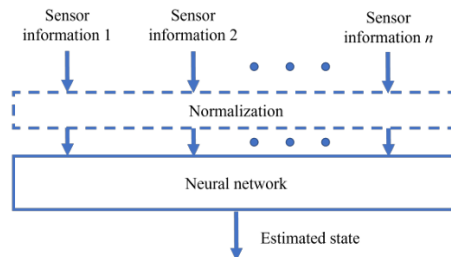


Рис. 3. Общая архитектура системы слияния данных на основе нейронной сети для оценки состояния автономного мобильного робота

Высокоуровневый контроллер преобразует результирующий вектор силы в угловые скорости колёс робота.

Целевое направление вычисляется как $\theta_{target} = \arctangent$ двух аргументов (F_y , F_x), то есть функция $\text{atan2}(F_y, F_x)$.

Угловая скорость ω регулируется пропорциональным регулятором для минимизации ошибки ориентации между текущим и целевым направлением движения.

Визуализация процесса работы выполняется с использованием библиотеки `matplotlib.animation`. Система обеспечивает детерминированное отображение движения робота в среде моделирования.

Голубые лучи отображают поле ультразвуковой навигации, а красные лучи отображают инфракрасный защитный буфер, используемый для предотвращения столкновений и локального планирования маршрута.

Визуализация в реальном времени реализована с использованием фреймворка `matplotlib.animation`, обеспечивая детерминированное отображение работы TVS. Голубые лучи обозначают поле ультразвуковой навигации, а красные лучи – инфракрасный защитный буфер (Рис.4) [7, 9 19, 20].

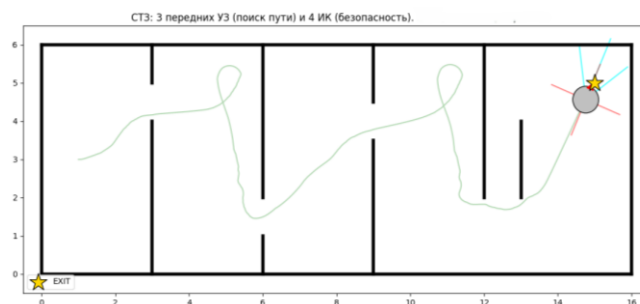


Рис. 4. Эмуляция движения мобильного робота в лабиринте.
Траектория движения отображается как линия движения

Заключение. Результаты работы подтверждают, что эмуляция системы технического зрения на основе инфракрасных и ультразвуковых датчиков формирует надёжную основу для исследований навигации мобильных роботов. Соблюдение физических моделей измерения времени пролёта и триангуляции в сочетании с фильтрами типа UKF позволяет достигать средних ошибок позиционирования порядка 0,2 м в сферических конфигурациях. Интеграция эмулированных сенсоров с методами мягких вычислений (нечеткая логика и нейронные сети) представляет собой наиболее эффективный путь к созданию автономных интеллектуальных робототехнических систем, способных функционировать в сложных реальных средах.

Модель эмуляции демонстрирует, что объединение виртуальных датчиков расстояния позволяет достичь точности обнаружения препятствий 89.61% в моделируемых сценариях, что подтверждается результатами [17] и эмуляции, проведенной в нашей работе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Faizah W., Rahiman W., Alhady S. A comprehensive study for robot navigation techniques, *Cogent Engineering*, 2019, Vol. 6, pp. 1-25.
2. Imrane M.L., Melingui A., et al. Artificial potential field neuro-fuzzy controller for autonomous navigation of mobile robots, *Proceedings of the 2025 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2025 (in print).
3. Neto W.A., et al. Experimental evaluation of data fusion techniques and adaptive control for mobile robot localization, *2025 26th International Carpathian Control Conference (ICCC): Proceedings, Starý Smokovec, High Tatras, Slovakia, 2025*, pp. 1-6.
4. Hu L., Wei C., Yin L. Fuzzy A* quantum multi-stage Q-learning artificial potential field for path planning of mobile robots, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2025, Vol. 141, Art. 109866.
5. Gualda D., Ureña J., Garcia Garcia J.C., et al. Simultaneous calibration and navigation (SCAN) of multiple ultrasonic local positioning systems, *Information Fusion*, 2018, Vol. 45, pp. 58-70.
6. Lee S., Song J. Global map building and navigation of mobile robot based on ultrasonic and IR sensor data fusion, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 2007, Vol. 13, No. 10, pp. 978-984.
7. Sakai A., Ingram D., Dinius J., et al. PythonRobotics: a Python code collection of robotics algorithms, arXiv preprint arXiv:1808.10703, 2018.
8. Xie Y., et al. A review of sensing technologies for indoor autonomous mobile robots, *Sensors*, 2025, Vol. 25, No. 3, Art. 789.
9. Hunter J.D. Matplotlib: a 2D graphics environment, *Computing in Science & Engineering*, 2007, Vol. 9, No. 3, pp. 90-95.
10. Zheng X., et al. GRS: generating robotic simulation tasks from real-world images, *arXiv preprint arXiv:2410.15536*, 2024. Available at: <https://arxiv.org/abs/2410.15536> (accessed 17 September 2025).
11. Siegwart R. Nourbakhsh I. Introduction to autonomous mobile robots. Cambridge: MIT Press, 2004, 458 p.
12. Siegwart R., Nourbakhsh I.R., Scaramuzza D. Introduction to autonomous mobile robots. 2nd ed. Cambridge: MIT Press, 2011, 472 p.
13. Liu Y., Wang S., Xie Y., Xiang T., Wu M. A review of sensing technologies for indoor autonomous mobile robots, *Sensors*, 2024, Vol. 24, No. 4, Art. 1222.

14. Xiao S. Using unscented Kalman filter to improve accuracy of estimation and comparison with extended Kalman filter, *AIP Conference Proceedings*, 2024, Vol. 3144, No. 1, Art. 050001.
15. Kuti J., Galambos P. Decreasing the computational demand of unscented Kalman filter based methods, *Proceedings of the 2025 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2025 (in print).
16. Gueaieb W., Miah M.S. An intelligent mobile robot navigation technique using RFID technology, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, Vol. 57, No. 9, pp. 1908-1917.
17. Crnokić B., Grubišić M. Fusion of infrared sensors and camera for mobile robot navigation system: simulation scenario, *XIII International Scientific Conference MMA 2018 – Flexible Technologies : Proceedings*, Novi Sad, Serbia, September 28–29, 2018. Novi Sad, 2018.
18. Rodríguez-Martínez E., Flores-Fuentes W., Achakir F., Sergiyenko O., Murrieta-Rico F. Vision-based navigation and perception for autonomous robots: sensors, SLAM, control strategies, and cross-domain applications—a review, *Eng.*, 2025, Vol. 6, No. 7, Art. 153.
19. Harris C.R., Millman K.J., van der Walt S.J., et al. Array programming with NumPy, *Nature*, 2020, Vol. 585, pp. 357-362.
20. Corke P. *Robotics, Vision & Control: Fundamental Algorithms in Python*. 3rd ed. Cham: Springer, 2023, 558 p.

Цеева Фатимат Мухамедовна – Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова; e-mail: mfmkbsu@mail.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: 88662422560; к.ф.-м.н.; доцент.

Арабов Нургали Евгеньевич – Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова; e-mail: mirkbsu@mail.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: 88662422560; ассистент.

Бозиева Асият Мухтаровна – Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова; e-mail: mirkbsu@mail.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: 88662422560; старший преподаватель.

Шомахов Замир Валериевич – Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова; e-mail: mfmkbsu@mail.ru; Российская федерация, г. Нальчик, Россия; тел.: 88662422560; к.ф.-м.н.; доцент.

Tseeva Fatimat Mukhammedovna – Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov; e-mail: mfmkbsu@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: +78662422560; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Arabov Nurgali Evgenievich – Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov; e-mail: mirkbsu@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: +78662422560; assistant.

Bozieva Asiyat Mukhtarovna – Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov; e-mail: mirkbsu@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: +78662422560; senior lecturer.

Shomakhov Zamir Valerievich – Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov; e-mail: mfmkbsu@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: +78662422560; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Раздел IV. Техническое зрение

УДК 004.932.2

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-250-258

С.Е. Бабин, П.А. Гессен, В.А. Павлова, В.А. Тупиков

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕТЕКЦИИ СИАМСКИХ СЕТЕЙ ПРИ ОГРАНИЧЕННОЙ РАЗМЕТКЕ С ОТБОРОМ ТРУДНЫХ ПРИМЕРОВ

Цель работы – разработка и экспериментальная оценка метода повышения качества детекции морских судов на основе архитектуры Attention RPN при малом количестве обучающих данных с интеграцией межклассового выбора трудных отрицательных примеров. Для достижения цели реализованы: адаптация модели в режиме тонкой настройки на основе пяти примеров, формирование специализированного датасета из 9 категорий судов (637 обучающих и 175 валидационных изображений), а также алгоритм отбора трудных отрицательных пар по косинусной мере сходства. Методологическую основу составили подходы глубокого обучения для детекции объектов на основе сиамских нейронных сетей, анализ распределений признаков в пространстве и алгоритмы создания трудных отрицательных примеров с вычислением межклассовых расстояний на основе косинусной метрики. Экспериментальная оценка выполнена на стандартных бенчмарках для обнаружения объектов при малом количестве данных. Внедрение межклассового выбора трудных отрицательных примеров позволило сократить долю ложноположительных детекций на ~18% и повысить показатель mAP в среднем на ~6% по сравнению с базовой моделью без отбора трудных негативных примеров. Наибольший прирост (до 9,1%) зафиксирован для классов с крупными объектами интереса. Полученные результаты демонстрируют, что целенаправленный отбор межклассовых трудных отрицательных примеров существенно повышает устойчивость метрико-ориентированных детекторов в условиях сильного дисбаланса и высокой внутриклассовой схожести. Практическая значимость работы заключается в возможности применения предложенного подхода для развертывания систем видеонаблюдения в задачах при отсутствии большой обучающей выборки и минимальном объеме разметки.

Сиамские нейронные сети; глубокое обучение; трудные отрицательные примеры.

S.E. Babin, P.A. Gessen, V.A. Pavlova, V.A. Tupikov

IMPROVING THE ROBUSTNESS OF SIAMESE NETWORK DETECTION WITH LIMITED ANNOTATION THROUGH HARD EXAMPLE MINING

The aim of this study is to develop and experimentally evaluate a method for improving the quality of marine vessel detection based on the Attention RPN architecture under conditions of limited training data, with the integration of inter-class hard negative mining. To achieve this goal, the following were implemented: model adaptation in a fine-tuning mode based on five examples, creation of a specialized dataset consisting of 9 vessel categories (637 training and 175 validation images), and an algorithm for selecting hard negative pairs using cosine similarity. The methodological foundation includes deep learning approaches for object detection based on Siamese neural networks, analysis of feature distributions in embedding space, and algorithms for generating hard negative samples by computing inter-class distances using the cosine metric. Experimental evaluation was carried out on standard few-shot object detection benchmarks. The integration of cross-class hard negative mining reduced the proportion of false positive detections by approximately 18% and increased the mean Average Precision (mAP) by about 6% on average compared to the baseline model without hard negative mining. The greatest improvement (up to 9.1%) was observed for classes with large target objects. The results demonstrate that targeted selection of inter-class hard negative examples significantly improves the robustness of metric-based detectors under conditions of strong class imbalance and high intra-class similarity. The practical significance of the work lies in the applicability of the proposed approach for deploying video surveillance systems in tasks where large training datasets and extensive annotation are unavailable.

Siamese neural networks; deep learning; hard negative mining.

Введение. Системы видеонаблюдения стали неотъемлемой частью современного мира и активно применяются в различных сферах жизни, таких как: обеспечение безопасности [1], промышленное производство [2, 3], транспорт [4, 5], здравоохранение [6, 7] и других областях. Масштабное использование камер и устройств видеонаблюдения привело к необходимости автоматизированного анализа большого количества поступающей информации в реальном времени. Эту проблему активно решают методы компьютерного зрения, получая и анализируя значимую информацию из сплошного потока данных. Одними из ключевых задач компьютерного зрения являются задачи обнаружения и классификации объектов интереса.

В последнее время был достигнут существенный прогресс в упомянутых задачах. С одной стороны он обусловлен ростом вычислительных мощностей и связанным с этим развитием глубоких нейронных сетей, таких как Faster R-CNN [8], семейство YOLO [9, 10], нейросети типа трансформер [11, 12], которые демонстрируют высокую точность, а порой и скорость работы. Современные архитектуры демонстрируют высокие показатели точности и устойчивости к вариативности сцены, освещенности и ракурсов. Улучшение метрик качества стало возможным благодаря усложнению моделей и использованию продвинутой стратегии обучения. С другой стороны это развитие стало возможным благодаря созданию больших наборов данных (датасетов) с уже размеченными экземплярами объектов, таких как MS COCO [13], PASCAL VOC [14]. И это же стало одной из проблем: достигнутый прогресс опирается на наличие значительных объемов размеченных данных, подготовка которых требует существенных временных затрат. В реальных ситуациях, особенно при появлении новых классов объектов или специфических условий съемки, собрать репрезентативную обучающую выборку зачастую невозможно. Зависимость современных моделей от больших датасетов становится ключевым ограничением их использования, что обуславливает необходимость разработки методов, обеспечивающих высокое качество распознавания при ограниченном количестве аннотационных данных.

Задача детекции объектов при ограниченном объеме размеченных данных (Few-Shot Object Detection, FSOD [15]) направлена на обход проблемы большой выборки данных и рассматривает модели, способные обнаруживать и распознавать новые виды объектов при наличии лишь нескольких размеченных примеров для каждого класса (обычно 1–10 изображений). Такие модели предварительно обучаются на базовых классах с достаточным объемом данных, после чего адаптируются к новым классам, для которых доступно лишь ограниченное число примеров без полного переобучения сети.

Одним из представителей данной группы методов являются сиамские нейронные сети – это архитектуры, предназначенные для обучения функции сходства между объектами. Их ключевая особенность заключается в использовании двух (или более) идентичных подсетей с общими весами, которые обрабатывают разные входы, отображая их в общее пространство признаков. Основная концепция состоит не в прямой классификации, а в минимизации расстояния между схожими объектами и увеличении расстояния между различными, что делает их отличным выбором в условиях ограниченного количества данных.

Предлагаемое решение. В данной работе исследуется архитектура сети внимания [16], представленная в библиотеке mmfewshot [17]. Ключевой особенностью метода является интеграция механизма внимания в сеть обнаружения регионов интереса, что позволяет использовать признаки нового изображения интереса (support) для фильтрации предполагаемых объектов на основном изображении (query). Эксперименты проводятся в рамках стратегии few-shot finetuning, предполагающей предварительное обучение на базовых классах с последующей донастройкой на целевых классах при ограниченном числе размеченных примеров.

В данной работе авторами предлагается рассмотреть работу описанной сети в рамках распознавания объектов интереса на целевом наборе изображений морских судов и улучшить качество обнаружения и при помощи добавления механизма межклассовых трудных отрицательных примеров.

Стратегия обучения

Основные моменты по архитектуре модели описаны в оригинальной статье [16], нам же для понимания работы необходимо разобрать как работает обучение сети для дальнейшего улучшения подаваемого набора данных. Для обучения модели применяется стратегии двустороннего контрастивного обучения. Обучающая выборка формируется в виде триплетов (q_c, s_c, s_n) , где q_c – изображение-запрос с объектом класса c ; s_c – положительный образец того же класса c , а s_n – отрицательный образец класса n ($n \neq c$). Такой подход учит модель не только находить соответствия между объектами одного класса, но и различать разные классы. Функция потерь L , вычисляемая для каждого предложения, определяется как сумма функции потерь сопоставления и функции потерь регрессии описывающего прямоугольника:

$$L = L_{\text{matching}} + L_{\text{box}},$$

где L_{matching} – бинарная кросс-энтропия. Она штрафует модель, если оценка сходства низкая для положительных пар (query и support одного класса) или высокая для отрицательных пар (разные классы); L_{box} – функция потерь регрессии описывающего прямоугольника, аналогичная используемой в Fast R-CNN [18]. Она применяется только к положительным парам для уточнения координат объекта.

Для компенсации вклада различных типов пар в обучение применяется отбор данных с поддержанием соотношения 1:2:1 между следующими группами:

- положительные предложения + положительный образец;
- фоновые предложения + положительный образец;
- любые предложения + отрицательный образец (negative support pairs).

Сеть внимания и многорегиональный детектор обучаются совместно, а общая функция потерь объединяет компоненты обоих модулей.

Сам процесс обучения делится на два этапа:

- ♦ предварительное обучение – модель обучается на полных данных базовых классов. На этом этапе настраиваются веса основополагающей сети и модулей сети внимания для извлечения общих признаков объектов и формирования метрики сходства;
- ♦ дообучение на малом числе примеров – проводится тонкая настройка модели на сбалансированной выборке, включающей как базовые, так и новые классы, где каждая категория представлена лишь ограниченным числом примеров.

Отбор трудных отрицательных примеров (Hard Negative Mining, HNM)

Это метод обучения моделей, при котором особое внимание уделяется таким примерам, которые не являются искомым объектом, но ошибочно классифицируются как положительный результат. Вместо того чтобы случайно выбирать отрицательные примеры, HNM отбирает регионы или объекты, наиболее похожие на целевой класс, но не являющиеся им, и использует их для усиления градиентов при обучении. Общая последовательность действий заключается в следующих этапах:

- ♦ для каждого конкретного класса формируются потенциально близкие отрицательные пары путем выбора визуально схожих объектов других классов;
- ♦ извлекаются их признаки с помощью обученной основной сети;
- ♦ измеряется сходство между признаками целевого класса и отрицательного примера путем использования косинусного расстояния;
- ♦ наиболее близкие примеры включаются в обучающий набор с сохранением метки о том, что данный пример не принадлежит интересующему классу.

Эксперименты

Описание датасета

Для оценки эффективности использования архитектуры сети внимания на задачах специализированной предметной области был сформирован небольшой датасет, собранный из открытых источников. Датасет содержит 9 категорий судов: Passenger ship (пассажирское судно), Unidentified (неопознанное судно), bulk-ship (балкер), container-ship (контейнеровоз), military-ship (военное судно), motor-ship (моторное судно), sailing-ship (парусное судно), tanker-ship (танкер) и small motor-ship (малое моторное судно). Обучающая выборка включает 637 изображений, а валидационная – 175 изображений.

Особенностью данного датасета является существенный дисбаланс классов (рис. 1). Наиболее многочисленным классом выступает *tanker-ship* (395 объектов в сумме), за ним следуют *sailing-ship* (383) и *small motor-ship* (267). Наименее представлены *motor-ship* (8 объектов), *Passenger ship* (18) и *bulk-ship* (31), что приводит к разнице между максимумом и минимумом почти в 50 раз.

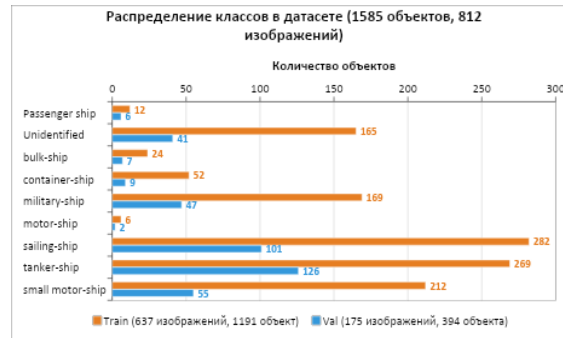


Рис. 1. Распределение объектов по классам в датасете

Датасет ориентирован на задачу *few-shot* обучения: для каждой из 9 категорий подготовлено по 5 *support*-изображений, используемых для инициализации модели. Такой дисбаланс отражает типичные условия реальных приложений, где данные по категориям распределены неравномерно. Особый интерес представляет обработка малочисленных классов (*motor-ship* – 8 объектов, *Passenger ship* – 18), позволяющая проверить обобщающую способность метода при минимальном объеме примеров.

Кроме количественного дисбаланса, датасет характеризуется высоким визуальным сходством категорий. В отличие от бенчмарков вроде PASCAL VOC или MS COCO, где новые классы существенно различаются (например, *bird*, *bus*, *cow*, *sofa*), здесь все категории относятся к общему классу морских судов и различаются в основном формой, размерами и пропорциями корпуса.

Детали реализации

Эксперимент проводился в режиме тонкой настройки на основе пяти примеров на основе модели сети внимания с базовой сверточной сетью извлечения признаков ResNet-50 [19] конфигурации C4, предварительно обученной на базовых классах MS COCO. Замороженными оставались все слои базовой сверточной сети; дообучению подвергались модули сети внимания и многореляционного детектора.

На каждой итерации обучения модель получала два типа входных данных: *query*-изображения, на которых нужно найти объекты, и наборы *support*-изображений – эталонных примеров, показывающих модели, как выглядят объекты разных классов. Размер батча составлял 2: каждый батч содержал 2 *query*-изображения, для каждого из которых формировался свой набор *support*-примеров. Из 9 классов датасета для каждого *query* случайным образом выбирались 6, для каждого из которых подавалось по 5 эталонных изображений. Таким образом, каждое *query*-изображение сопровождалось 30 *support*-примерами: 5 – с примерами целевого класса и 25 – с примерами пяти других классов, что позволяло модели учиться отличать нужный класс от остальных. Общее число итераций составило 3000.

Оптимизация проводилась методом стохастического градиентного спуска [20] с начальной скоростью обучения $\text{lr} = 0.001$, импульсом 0.9 и затуханием весов 10^{-4} . Для головы детектора применялся удвоенный множитель скорости обучения, что ускорило адаптацию классификационных и регрессионных весов многореляционного детектора.

Финальная оценка произведена на полном валидационном наборе (175 изображений). Метрики рассчитаны по протоколу COCO: $\text{mAP@}[\cdot 50:95]$, AP50, AP75, а также AP по размерам объектов (малый, средний, большой).

Результаты. Кривые функции потерь представлены на рис. 2 и 3. Суммарная потеря уменьшилась с 11.37 на начальных итерациях до 0.18 на 3000-й, что соответствует снижению в 62 раза. Наиболее сильное падение произошло в фазе разогрева (первые 200 итераций), после чего потери убывали монотонно. Функция потерь сети внимания стабилизировались к 300-й итерации, указывая на быструю адаптацию механизма внимания к новым классам.



Рис. 2. Суммарная функция потерь с EMA-сглаживанием

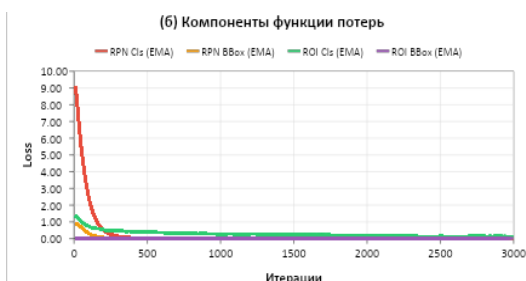


Рис. 3. Компоненты функции потерь

В ходе обучения валидация проводилась на подмножестве из 40 изображений каждые 500 итераций (рис. 4). Динамика метрик была немонотонной: AP50 снизился с 35.8% (итерация 500) до 31.4% (итерация 1000), что может быть обусловлено стохастичностью few-shot обучения и малым размером валидационной выборки (40 изображений). В интервале 1000-2000 итераций наблюдалось постепенное восстановление метрик, после чего снижение $\lg$ на итерации 2000 обеспечило рост: AP50 увеличился с 34.0% (итерация 2000) до 43.9% (итерация 3000), т.е. на +9.9 п.п. Та же ситуация была с $mAP@[.50:.95]$: значение выросло с 21.6% (итерация 2000) до 26.1% (итерация 3000), +4.5 п.п. Это подтверждает эффективность ступенчатого уменьшения скорости обучения для более точной адаптации модели в режиме few-shot.

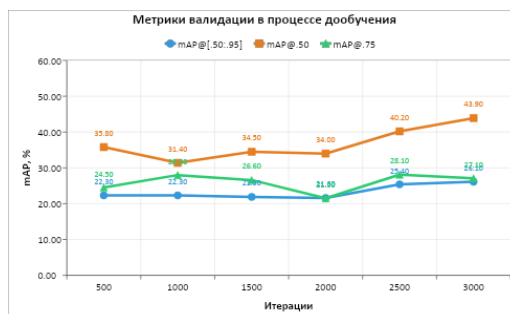


Рис. 4. Метрики валидации ($mAP@[.50:.95]$, AP50, AP75) в процессе дообучения

После завершения обучения была проведена оценка модели на полном валидационном наборе из 175 изображений (394 аннотации) с использованием стандартных метрик COCO. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты детекции на полном валидационном наборе

Метрика	Значение
$mAP@[.50:.95]$	28.7%
AP@.50	46.6%
AP@.75	32.4%
AP (small)	0.0%
AP (medium)	31.9%
AP (large)	32.7%
AR@100	35.5%

Расширение валидационной выборки с 40 до 175 изображений привело к повышению метрик (mAP: +2.6 п.п., AP50: +2.7 п.п.), что свидетельствует об устойчивости модели и отсутствии переобучения на ограниченном валидационном подмножестве.

На рис. 5 представлено распределение mAP по размерам объектов на каждом этапе промежуточной валидации. Малые объекты (площадь меньше 1024 пикселей) не обнаруживаются моделью на протяжении всего обучения ($AP_s = 0\%$). Это обусловлено архитектурой ResNet-50 конфигурации C4, которая извлекает признаки с единственного уровня карты признаков, что недостаточно для детекции малых объектов. На полном валидационном наборе (175 изображений) средние объекты достигают $AP_m = 31.9\%$, крупные – $AP_l = 32.7\%$, что подтверждает эффективность применения модели для объектов среднего и крупного масштаба.

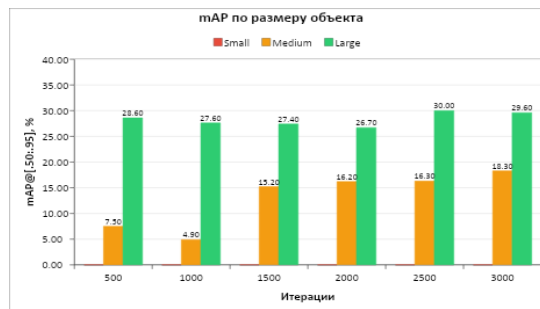


Рис. 5. mAP@[.50:.95] по размеру объекта на каждом этапе валидации

На рис. 6 представлены результаты запуска обученной сети на изображениях валидационной выборки с порогом уверенности 0.7. Модель успешно локализует крупные суда различных типов, однако наблюдаются ошибки при разграничении визуально сходных классов (tanker-ship и small motor-ship).

В табл. 2 приведено сравнение полученных результатов с официальными тестами Attention RPN на стандартных датасетах. Источником данных являются результаты, опубликованные в mmfewshot [17].

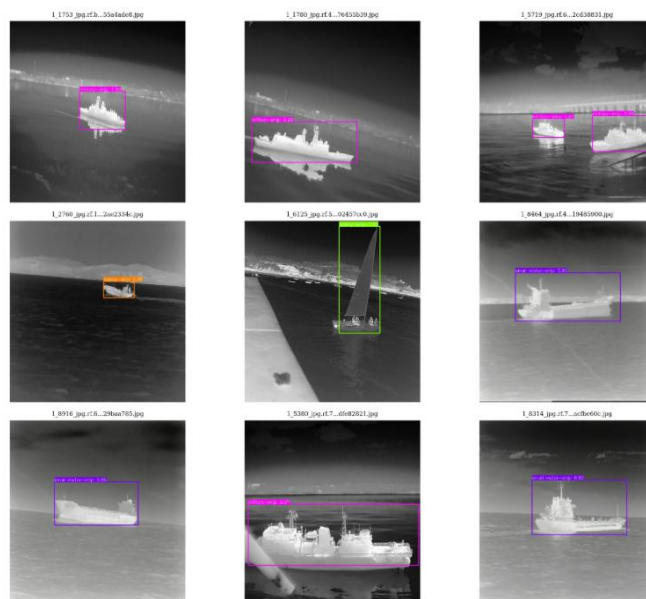


Рис. 6. Примеры обнаружения и классификации

Таблица 2

Сравнение результатов few-shot детекции сети внимания

Метод	Датасет	Novel	Shot	AP50, %	mAP, %
Attention RPN	MS COCO	20	10	–	9.2
Attention RPN	MS COCO	20	30	–	14.8
Attention RPN	VOC Split 1	5	5	51.7	
Attention RPN	VOC Split 2	5	5	37.0	
Attention RPN	VOC Split 3	5	5	48.9	
Attention RPN	Морские суда	9	5	46.6	28.7

Полученное значение $mAP@[.50:.95] = 28.7\%$ при конфигурации с пятью примерами значительно превосходит тесты разработчиков на наборе MS COCO (9.2% при десяти примерах и 14.8% при тридцати), что соответствует превышению в 3.1 раза при вдвое меньшем числе обучающих примеров (5 против 10). Данное различие объясняется меньшим числом целевых категорий (9 против 20) и специализированным характером предметной области, в которой модель может опираться на общие признаки класса «судно», частично сформированные при обучении на базовых классах COCO (в частности, категория boat входит в число базовых).

При сравнении по метрике AP50 с результатами на PASCAL VOC, полученное значение 46.6% превосходит наиболее сложное разбиение (Split 2: 37.0%, novel-классы: aeroplane, bottle, cow, horse, sofa) на 9.6 п.п., превышает среднее по всем трем разбиениям (45.9%) и приближается к результату Split 3 (48.9%), в котором novel-классом является boat – ближайшая категория к нашей предметной области. Split 2 считается наиболее сложным разбиением ввиду визуального сходства между отдельными novel- и base-классами (cow/horse), что аналогично ситуации в нашем датасете, где различные типы судов обладают высокой степенью визуального сходства.

После применения описанного ранее метода HNM на представленном наборе данных были получены результаты, представленные в табл. 3.

Таблица 3

Результаты после улучшения

Метрика	Значение
$mAP@[.50:.95]$	32.6%
$AP@.50$	53.9%
$AP@.75$	39.7%
AP (small)	0.0%
AP (medium)	38.9%
AP (large)	41.8%
AR@100	42.5%

Таким образом внедрение HNM позволило сократить долю ложноположительных детекций на ~18% и в среднем повысить показатель mAP ~6,4% по сравнению с базовой моделью без отбора трудных негативных примеров.

Заключение. Проведенное исследование подтвердило, что применение архитектуры Attention RPN эффективно адаптируется к задаче few-shot детекции объектов, в том числе морских судов, при выраженном межклассовом сходстве и дисбалансе данных.

Обучение в режиме тонкой настройки на пяти примерах на специализированном датасете из 9 категорий позволило получить базовое значение $mAP@[.50:.95]=28,7\%$ и $AP50=46,6\%$ на полном валидационном наборе, что свидетельствует о способности модели формировать устойчивое пространство признаков даже при ограниченном числе опорных примеров.

Интеграция механизма межклассового hard-negative mining продемонстрировала количественно измеримый вклад в повышение качества детекции: $mAP@[.50:.95]$ увеличился до 32,6%, $AP50$ – до 53,9%, $AR@100$ – до 42,5%, а доля ложноположительных срабатываний сократилась приблизительно на 18%. Наиболее выраженный прирост наблюдался для объектов среднего и крупного масштаба ($AP_m=38,9\%$, $AP_l=41,8\%$), что подтверждает эффективность целенаправленного отбора трудных отрицательных примеров при высокой визуальной схожести классов. Отсутствие детекции малых объектов ($AP_s=0\%$) выявило архитектурное ограничение конфигурации C4 и обозначило направление дальнейшей модернизации модели.

Предложенный подход обеспечивает повышение точности без увеличения объема разметки и может быть применен при разработке прикладных решений мониторинга морской инфраструктуры и судоходства в условиях ограниченных обучающих данных. В рамках дальнейшего развития работы стоит применить иные стратегии отбора данных или изменить аппарат получения признаков объектов интереса на более совершенный.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhao J., Masood R., Seneviratne S. A Review of Computer Vision Methods in Network Security, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, Vol. PP, pp. 1-1. doi: 10.1109/COMST.2021.3086475.
2. Casas E., Ramos L.T., Romero C., Rivas-Echeverria F. A Review of Computer Vision Applications for Asset Inspection in the Oil and Gas Industry, *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2025, Vol. 5(3), pp. 100246. doi: 10.1016/j.jpse.2024.100246.
3. Zhou L., Zhang L., Konz N. Computer Vision Techniques in Manufacturing, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, Vol. 53 (1), pp. 105-117. doi: 10.1109/TSMC.2022.3166397.
4. Suguna A. Computer Vision for Autonomous Driving, *International Journal of Innovative Research in Information Security*, 2025, Vol. 11, pp. 846-850. doi: 10.26562/ijiris.2025.v11i12.03.
5. Dilek E., Dener M. Computer Vision Applications in Intelligent Transportation Systems: A Survey, *Sensors*, 2023, Vol. 23 (6), pp. 2938. doi: 10.3390/s23062938.
6. Kabir M.M., Rahman A., Hasan M.N., Mridha M.F. Computer Vision Algorithms in Healthcare: Recent Advancements and Future Challenges, *Computers in Biology and Medicine*, 2025, Vol. 185, pp. 109531. doi: 10.1016/j.combiomed.2024.109531.
7. Gao J., Yang Y., Lin P., Park D. Computer Vision in Healthcare Applications, *Journal of Healthcare Engineering*, 2018, pp. 1-4. doi: 10.1155/2018/5157020.
8. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks, *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 2015, pp. 91-99.
9. Cong X., Li S., Chen F., Liu C., Meng Y. A Review of YOLO Object Detection Algorithms Based on Deep Learning, *Frontiers in Computing and Intelligent Systems*, 2023, Vol. 4(2), pp. 17-20. doi: 10.54097/fcis.v4i2.9730.
10. Lei M., Li S., Wu Y., Hu H., Zhou Y., Zheng X., Ding G., Du S., Wu Z., Gao Y. YOLOv13: Real-Time Object Detection with Hypergraph-Enhanced Adaptive Visual Perception, *arXiv*, 2025. doi: 10.48550/arXiv.2506.17733.
11. Carion N., Massa F., Synnaeve G., Usunier N., Kirillov A., Zagoruyko S. End-to-End Object Detection with Transformers, *European Conference on Computer Vision (ECCV)*. Springer, 2020, pp. 213-229. doi: 10.1007/978-3-030-58452-8_13.
12. Shehzadi T., Hashmi K.A., Liwicki M., Stricker D., Afzal M.Z. Object Detection with Transformers: A Review, *Sensors*, 2025, Vol. 25, pp. 6025. doi: 10.3390/s25196025.
13. Lin T.Y., Maire M., Belongie S., Hays J., Perona P., Ramanan D., Dollár P., Zitnick C.L. Microsoft COCO: Common Objects in Context, *European Conference on Computer Vision (ECCV)*. Springer, 2014, pp. 740-755.
14. Everingham M., Van Gool L., Williams C.K.I., Winn J., Zisserman A. The Pascal Visual Object Classes (VOC) Challenge, *International Journal of Computer Vision*, 2010, Vol. 88 (2), pp. 303-338.
15. Kohler M., Eisenbach M., Gross H.M. Few-Shot Object Detection: A Comprehensive Survey, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2023, Vol. PP. doi: 10.1109/TNNLS.2023.3265051.

16. Fan Q., Zhuo W., Tang C.K., Tai C.L. Few-Shot Object Detection with Attention-RPN and Multi-Relation Detector, *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2020, pp. 4013–4022.
17. OpenMMLab. MMEFWSHOT: A Toolbox for Few Shot Learning Detection and Classification. Available at: <https://mefewshot.readthedocs.io/en/latest/> (accessed 14 January 2026).
18. Girshick R. Fast R-CNN, *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2015, pp. 1440–1448.
19. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 770–778. doi: 10.1109/CVPR.2016.90.
20. Robbins H.E. A Stochastic Approximation Method, *Annals of Mathematical Statistics*, 1951, Vol. 22, pp. 400–407.

Бабин Степан Евгеньевич – АО «Научно-производственное предприятие «Авиационная и морская электроника»; e-mail: babinstepan12@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88123274667; тестировщик программного обеспечения.

Гессен Павел Алексеевич – АО «Научно-производственное предприятие «Авиационная и морская электроника»; e-mail: gessen_pa@nppame.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88123274667; зам. начальника центра средств интеллектуальной обработки изображений НПК РТС СН.

Павлова Валерия Анатольевна – АО «Научно-производственное предприятие «Авиационная и морская электроника»; e-mail: pavlova@nppame.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88123274667; зам. директора НПК РТС СН по НИОКР.

Тупиков Владимир Алексеевич – АО «Научно-производственное предприятие «Авиационная и морская электроника»; e-mail: tupikov@nppame.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88123274667; зам. ген. директора; директор НПК РТС СН.

Babin Stepan Evgenievich – Scientific and Production Enterprise Aviation and Marine Electronics, JSC; e-mail: babinstepan12@yandex.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +78123274667; software tester.

Gessen Pavel Alekseevich – Scientific and Production Enterprise Aviation and Marine Electronics, JSC; e-mail: gessen_pa@nppame.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +78123274667; deputy head of the Intelligent Image Processing Center of the Scientific and Production Corporation RTS SN.

Pavlova Valeria Anatolyevna – Scientific and Production Enterprise Aviation and Marine Electronics, JSC; e-mail: pavlova@nppame.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +78123274667; deputy director for R & D, Scientific and Production Complex of Special-Purpose Robotic Systems.

Tupikov Vladimir Alekseevich – Scientific and Production Enterprise Aviation and Marine Electronics, JSC; e-mail: tupikov@nppame.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +78123274667; deputy general director, director of the Scientific and Production Complex of Special-Purpose Robotic Systems.

УДК 004.428

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-258-271

Н.А. Бочаров, К.А. Суминов, М.А. Кирилюк, Н.Б. Парамонов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К УНИФИКАЦИИ СВЯЗУЮЩЕГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОЙ ПЛАТФОРМЫ «ЭЛЬБРУС»

Импортозамещение аппаратно-программных систем управления является одним из ключевых факторов развития современной отечественной робототехники. Ограниченность программной экосистемы российских вычислительных платформ затрудняет их применение в составе бортовых вычислительных систем (БВС) робототехнических комплексов (РТК), несмотря на появление современных отечественных многоядерных процессоров, например, семейства «Эльбрус», обеспечивающих конкурентоспособные характеристики по производительности и энергоэффективности. ROS (Robot Operating System) и его развитие — ROS 2 — широко используются для разработки программного обеспечения РТК, однако их официальная поддержка ограничена архитек-

турами x86 и ARM под управлением распространённых Linux-дистрибутивов. Сохранение значительного объёма прикладного программного обеспечения на ROS, несмотря на прекращение его официальной поддержки, а также активное развитие ROS 2 обуславливают потребность в обеих версиях, функционирующих на отечественной аппаратно-программной платформе (АПП). Целью работы является исследование подходов к унификации связующего программного обеспечения робототехнических комплексов на базе ROS и ROS 2 для АПП «Эльбрус». Авторами выполнено портирование с использованием бинарной трансляции на уровне приложений и полностью нативной сборки, включающей адаптацию архитектурных зависимостей, модификацию архитектурно-зависимого кода и формирование deb-пакетов. Проведены экспериментальные исследования в различных конфигурациях запуска, включая совместную работу ROS и ROS 2. Результаты тестирования подтверждают возможность интеграции АПП «Эльбрус» в экосистему современной робототехники и демонстрируют преимущество нативной реализации по показателям производительности по сравнению с использованием бинарного транслятора. Практическая значимость работы заключается в расширении инструментальной базы разработки РТК на отечественной АПП и снижении технологической зависимости при создании систем управления РТК.

ROS; ROS 2; «Эльбрус»; портирование программного обеспечения; бинарная трансляция; нативная сборка; робототехнические комплексы.

N.A. Bocharov, K.A. Suminov, M.A. Kirilyuk, N.B. Paramonov

APPROACHES TO MIDDLEWARE UNIFICATION FOR ROBOTIC SYSTEMS ON THE ELBRUS HARDWARE–SOFTWARE PLATFORM

Import substitution of hardware–software control systems is a key enabler for the development of Russia's domestic robotics industry. The limited software ecosystem of Russian computing platforms still constrains their use in onboard computing systems (OCS) of robotic systems (RS), even though modern domestic multicore processors—such as the Elbrus—offer competitive performance and energy efficiency. ROS (Robot Operating System) and its successor ROS 2 are widely adopted for robotics software development, but official support is largely restricted to x86 and ARM architectures running mainstream Linux distributions. At the same time, a substantial amount of deployed application software remains ROS-based, while ROS 2 continues to evolve rapidly. This creates a practical need to support both ROS and ROS 2 on domestic hardware–software platforms. This work investigates approaches to unifying robotics middleware based on ROS and ROS 2 for the Elbrus platform. We implemented two porting strategies: (1) application-level binary translation and (2) a fully native build. The native approach included adapting architecture-specific dependencies, modifying architecture-dependent code, and producing Debian (deb) packages. We then evaluated both approaches under multiple runtime configurations, including scenarios where ROS and ROS 2 operate together. Experimental results confirm that the Elbrus platform can be integrated into the modern robotics software ecosystem. They also show that the native implementation delivers higher performance than the binary-translated solution. The proposed work expands the toolchain available for robotics development on domestic platforms and reduces technological dependence when building control systems for robotic systems.

ROS; ROS 2; Elbrus; software porting; binary translation; native compilation; robotic systems.

Введение. В современной отечественной робототехнике одним из ключевых направлений является импортозамещение вычислительных систем и программного обеспечения (ПО). Появление новых отечественных многоядерных процессоров, таких как «Эльбрус-2С3» [3], «Эльбрус-8С2» [4] открывает новые возможности в части аппаратного обеспечения робототехнических комплексов. Однако программная среда ОС «Эльбрус» [5] пока содержит лишь ограниченный набор инструментов для разработки систем управления роботами, что затрудняет применение платформы в робототехнике. Таким образом оснащение систем управления РТК вычислительной техникой на базе российских микропроцессоров [1] и разработка отечественного ПО остается актуальной задачей [2].

На текущий момент в мире нет общепринятых стандартов программного обеспечения бортовых информационно-вычислительных систем РТК ВН или же для групп таких роботов [6]. Существующие системы существенно различаются, и при работе с каждой из них возникают специфические трудности. Вместе с тем уже появились программные

платформы, предназначенные для стандартизации подходов к разработке робототехнических систем, а также для предоставления единой среды управления и контроля. В табл. 1 приведено сравнение программных платформ для разработки ПО для РТК.

Таблица 1

Сравнение программных платформ для разработки ПО для РТК

Фреймворк	ОС	Протоколы коммуникации	Поддержка реального времени	Год обновления	Лицензия
1	2	3	4	5	6
ROS	Ubuntu Linux	TCPROS/UDPROS	нет	2025	BSD
ROS2	Linux Windows macOS и др.	DDS	да	2025	Apache 2.0
MSR-DS	Windows 7 и выше	DSS/CCR	нет	2012	MS-PL
ERSP	Windows XP и выше	нет данных	нет	2004	Коммерческая
Open-RTM	Linux Windows macOS Raspberry PiOS	CORBA TCP UDP	да	2024	LGPL
OROCOS	Linux Win- dows RTOS	CORBA TCP UDP CAN RS232	да	2016	LGPL
OPRoS	Linux Win- dows RTOS	TCP UDP CAN RS232	да	2013	LGPL

Наиболее распространённой из них является ROS (Robot Operating System). В мировом сообществе ROS широко используется для разработки ПО робототехнических систем [7, 8]. ROS – свободно распространяемый фреймворк, обеспечивающий абстракцию от аппаратных средств, функционирование в парадигме «издатель-подписчик» и межпроцессное взаимодействие через топики и сообщения. В 2025 году официальная поддержка ROS 1 была прекращена [9], и дальнейшее развитие экосистемы осуществляется исключительно в рамках ROS 2. Несмотря на то что переход от ROS 1 к ROS 2 продолжается уже достаточно долго, в настоящее время сохраняется значительный объём программного обеспечения, разработанного для ROS 1, перенос которого на ROS 2 требует существенных ресурсов. Это обуславливает сохраняющуюся потребность в использовании как ROS 1, так и ROS 2.

Официальная поддержка ROS 1 и ROS 2 ограничена Linux-дистрибутивами, в первую очередь Ubuntu и Debian, под архитектуры x86, ARM. Это означает, что для использования ROS 1, ROS 2 на отечественной платформе «Эльбрус» необходимо провести их портирование.

Унификация связующего программного обеспечения на базе Robot Operation System. ROS изначально был разработан в лаборатории искусственного интеллекта стэнфордского университета, а затем продолжил свое развитие при поддержке научно-исследовательского института робототехники [10]. ROS представляет собой надстройку над операционной системой, а также набор различных библиотек: OpenCV [11] (алгоритмы компьютерного зрения и обработки изображений), PCL [12] (облака 3D-точек), Ogre (объектно-ориентированный графический движок), Orocos (алгоритмы управления движением) и многие другие [13]. К основным особенностям ROS относятся: организа-

ция одноранговой сети между узлами, базирование программного обеспечения на уже существующих решениях в виде популярных библиотек, поддержка различных языков программирования, открытый исходный код. Каждое устройство в ROS может обратиться к любому другому узлу, а ведущее устройство используется только для маршрутизации и обеспечивает механизм поиска. В основе взаимодействия между устройствами под управлением ROS лежит пересылка сообщений.

Основным принципом обмена данными между программными компонентами является модель взаимодействия «издатель-подписчик» (publisher-subscriber) [14]. Это асинхронный механизм, при котором один узел (издатель) публикует сообщения на определенный топик, а другие узлы (подписчики) подписываются на этот топик и получают данные.

Этот подход позволяет создавать гибкие и масштабируемые системы, где каждый узел может работать независимо от других, получая или отправляя данные по мере необходимости. Благодаря использованию такого принципа множество сенсоров и исполнительных механизмов могут взаимодействовать друг с другом без жесткой синхронизации.

Топики в данном случае служат каналами для передачи сообщений между узлами. Каждый топик связан с определенным типом сообщений, и все узлы, которые публикуют или подписываются на этот топик, обмениваются данными этого типа. Взаимодействие через топики позволяет создавать системы, где множество узлов может обмениваться данными без прямого подключения и работать независимо друг от друга, обеспечивая параллельное выполнение различных задач и обеспечивая функционирование в БВС на базе разнородных вычислительных комплексов различной аппаратной архитектуры.

Схема обработки сообщений в ROS не зависит от языка программирования, таким образом одновременно могут работать модули, написанные на различных языках программирования. ROS базируется на наборе автономных библиотек, что позволяет использовать готовые проверенные решения для своего робота. Клиент-серверная архитектура ROS представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структура системы ROS

Развитием ROS является ROS 2, это следующее поколение, которое было анонсировано на ROSCon 2014 и выпущено в декабре 2017 года [15]. Проведенный анализ показал, что ROS 2 имеет ряд отличий от ROS 1 [16, 17], которые значительно влияют на процесс портирования [2] на другую аппаратно-программную платформу. Среди таких особенностей стоит отметить следующие:

1. ROS 2 использует новые библиотеки и технологии поддержки реального времени и встраиваемых систем.
2. В ROS 2 узлы не имеют глобальных имен и могут быть частью группы (namespace), а топики в ROS 2 имеют типы и качество обслуживания (QoS), которые определяют, как сообщения будут доставляться и храниться.
3. ROS 2 использует различные реализации DDS (Data Distribution Service) [18] в качестве промежуточного слоя, такие как Fast-RTPS, CycloneDDS и RTI Connext, для обеспечения низкоуровневой коммуникации между узлами.

4. В отличие от ROS, ROS 2 имеет меньше зависимостей от сторонних библиотек и инструментов, таких как Boost, и использует более современные стандарты, такие как Си++14 и Python 3.

5. ROS 2 требует наличия Python 3 и CMake для установки и сборки.

6. ROS 2 использует новый формат пакетов ament, который основан на CMake и позволяет более гибко настраивать процесс сборки и тестирования.

7. ROS 2 также использует новый формат сообщений, называемый IDL, который позволяет более легко интегрировать различные языки программирования и сериализаторы.

8. ROS 2 также имеет новую концепцию пространств имен (namespace) и групп (group), которые позволяют организовывать узлы в логические единицы.

9. ROS 2 имеет новые инструменты для работы с роботами, такие как ROS 2cli, rclcpp, rclpy и другие.

10. ROS 2 также поддерживает совместимость с ROS 1 через специальный мост, который позволяет обмениваться сообщениями между двумя версиями фреймворка.

Пример архитектуры взаимодействия компонентов ROS 2 представлен на рис. 2.

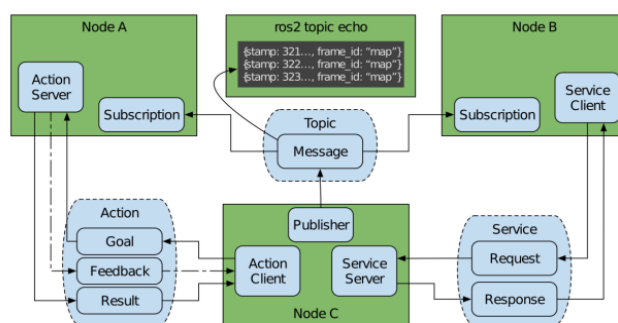


Рис. 2. Пример архитектуры взаимодействия компонентов ROS 2

Проведённый анализ показал, что актуальные дистрибутивы ОС для АПП «Эльбрус» не содержат значительную часть зависимостей фреймворков ROS и ROS 2, в том числе таких, как Gazebo, Ignition, Ogre, EmPY, PCL. Таким образом, для создания связующего программного обеспечения РТК данные пакеты необходимо портировать или разработать их функциональные аналоги для АПП «Эльбрус». С учетом проведенного анализа зависимостей по пакетам и версиям ядра для реализации связующего программного обеспечения РТК для платформы «Эльбрус» были определены следующие версии дистрибутивов: ROS 2 Galactic Geochelone, ROS 1 Noetic Ninjemys, которые адаптированы под дистрибутивы Debian и Ubuntu, функционирующие на ядре Linux 5.10.

Особенности АПП «Эльбрус» при реализации ROS. Для адаптации открытых исходных кодов ROS 1, ROS 2 были выстроены деревья топологических зависимостей для всех пакетов версий base, а также некоторых дополнительных пакетов, применение которых распространено в области наземной робототехники, таких как ros-bridge для осуществления взаимодействия ROS 1 и ROS 2, систем логирования и пр. В рамках портирования ROS Noetic Ninjemys на АПП «Эльбрус» потребовалась адаптация более 90 пакетов ROS, а также более 200 пакетов зависимостей. Для ROS 2 Galactic Geochelone потребовалась адаптация 197 пакетов ROS 2 и более 1200 пакетов зависимостей. Кроме того, при анализе исходных кодов этих пакетов было выявлено, что многие из них, несмотря на использование в дистрибутивах ROS 1 и ROS 2, являются нестабильными, о чём явно указано в документации к ним.

С учётом этих особенностей и большого количества пакетов были рассмотрены два подхода: сначала портирование с использованием бинарного транслятора, а затем полностью нативное портирование.

Программное обеспечение платформы «Эльбрус» включает два метода двоичной трансляции. Первый метод – это система полной двоичной трансляции. В ней транслятор размещается между микропроцессором и исполняемыми x86-кодами. Он переводит коды BIOS, ОС, драйверов и приложений. Вычислительный комплекс на базе процессора

«Эльбрус» с такой трансляцией полностью идентичен для пользовательской программы вычислительным комплексам на x86-процессорах. При втором подходе система двоичной трансляции выступает как обычное Linux приложение и функционирует под контролем ОС Linux. Она обеспечивает запуск x86-Linux приложений, которые могут выполняться параллельно с нативными приложениями платформы «Эльбрус».

Для реализации был выбран второй вариант использования. При этом работа с бинарным транслятором уровня приложений предполагает установку гостевой файловой системы на ВК «Эльбрус». Для функционирования ROS 2 на АПП «Эльбрус» в таком режиме в качестве гостевой системы можно использовать любую из официально поддерживаемых ROS, например Ubuntu 20.04 Focal Fossa. Схема работы такой системы показана на рис. 3 [19].

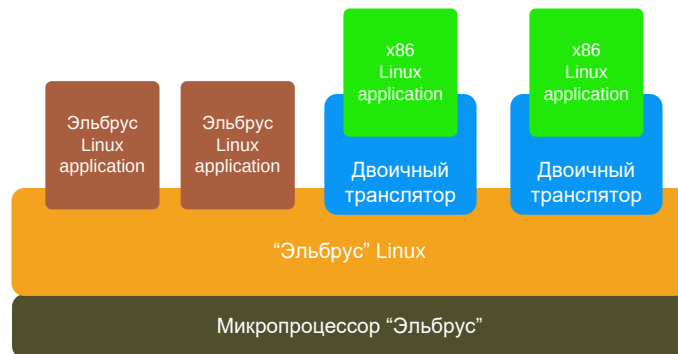


Рис. 3. Схема работы системы двоичной трансляции Linux приложений

При нативном портировании ROS 1 и ROS 2 использовались архитектурно-зависимые пакеты, поставляемые в комплекте с ОС «Эльбрус Линукс 8.0» [20]. Открытые исходные коды ROS 1 Noetic Ninjemys и ROS 2 Galactic Geochelone потребовали существенной доработки и адаптации для корректного исполнения на аппаратно-программной платформе «Эльбрус» с архитектурой команд не ниже версии v4 [21]. Необходимость внесения изменений обусловлена принципиальными архитектурными особенностями микропроцессоров семейства «Эльбрус».

Хотя ROS, ROS 2, поддерживает различные процессорные архитектуры (x86, ARM), эти архитектуры значительно отличаются от архитектуры «Эльбрус» рядом особенностей, таких как [22]:

1. Принцип широкого командного слова (VLIW), предполагающий одновременное исполнение множества операций обработки информации (до 23 операций для скалярных данных и до 33 операций для векторных форматов) за один такт.
2. Принципы явного параллельного исполнения команд (EPIC), предполагающие передачу функций распараллеливания вычислений оптимизирующему компилятору, позволяющему обеспечить максимальную производительность используемого микропроцессора.
3. Обеспечение в микропроцессоре многоуровневой системы параллелизма, включающей параллелизм операций, векторный параллелизм, параллелизм потоков управления на общей памяти, параллелизм задач.

Ключевая черта архитектуры «Эльбрус» – так называемое явное управление параллелизмом, когда компилятор, зная внутреннее устройство процессора, сам определяет распределение операций по ядрам микропроцессора и возможность их одновременного исполнения. В традиционных архитектурах типа RISC или CISC на вход процессора поступает поток инструкций, которые рассчитаны на последовательное исполнение. Процессор может в определенной мере детектировать независимые операции и запускать их параллельно и даже менять их порядок. Однако динамический анализ зависимостей и поддержка внеочередного исполнения имеет свои ограничения: лучшие современные процессоры способны анализировать и запускать на исполнение до 8 команд за такт.

В архитектуре «Эльбрус» основную работу по анализу зависимостей и оптимизации порядка операций берет на себя компилятор. Процессору на вход поступают широкие команды (ШК), в каждой из которых закодированы инструкции для всех ядер микропроцессора, которые должны быть запущены на данном такте. От процессора не требуется анализировать зависимости между операндами или переставлять операции между широкими командами: все это делает компилятор, исходя из анализа исходного кода и планирования ресурсов микропроцессора.

Компилятор способен анализировать исходный код гораздо тщательнее, чем аппарат RISC/CISC процессора, и находить больше независимых операций. Поэтому в архитектуре «Эльбрус» больше параллельно работающих исполнительных устройств, чем в традиционных архитектурах.

Проблемы реализации ROS на АПП «Эльбрус». Ввиду наличия представленных выше архитектурных и программных особенностей исходные коды практически всех необходимых пакетов потребовали адаптации как на уровне программной реализации, так и на уровне систем сборки.

В пакетах с небольшим объемом кода на C/C++ изменения зачастую не требовались. Однако доля таких пакетов в общем объеме зависимостей оказалась незначительной. В исходных кодах подавляющего большинства пакетов потребовались модификации, обусловленные наличием ассемблерных вставок, ориентированных на архитектуры x86 или ARM и требовавших переписывания либо замены на архитектурно-независимые реализации, «жестко» закодированных констант, определяющих корректность работы на конкретной архитектуре или операционной системе, скрытых архитектурных предположений, оформленных в виде так называемых «магических чисел», использования встроенных компиляторных расширений (например, GCC built-ins), не полностью поддерживаемых компилятором платформы «Эльбрус».

Во многих случаях такие константы явно не документировались и не были вынесены в конфигурационные параметры. В результате исходные коды успешно компилировались, однако выполнение программ завершалось ошибками, чаще всего связанными с некорректным обращением к памяти. Это проявлялось в виде ошибок сегментации, повреждения кучи, некорректной работы многопоточных участков кода.

Среди регулярно встречающихся проблем можно выделить:

1. Фиксированные размеры буферов, приводящие к переполнению при изменении соглашений о выравнивании данных.
2. Жестко заданные шаги выравнивания структур в памяти (например, предположение о 16- или 32-байтном выравнивании, характерном для SSE/AVX).
3. Использование системных констант и флагов, специфичных для glibc определенной версии.
4. Предположения о размере типов данных (например, implicit приведение указателей к long, различия в Application Binary Interface).

В подобных ситуациях требовался детальный анализ исходного кода, отладка с использованием инструментов трассировки и профилирования, а также поэтапная замена архитектурно-зависимых участков на переносимые реализации.

Отдельные пакеты, такие как `gclru`, `PCL` и `CycloneDDS`, потребовали значительных изменений ввиду сложной внутренней архитектуры, активного использования многопоточности, шаблонных метапрограммных конструкций, а также наличия большого количества архитектурных зависимостей. В частности, в `PCL` потребовалась корректировка архитектурно-оптимизированных участков, а в `CycloneDDS` — адаптация низкоуровневых механизмов сетевого взаимодействия и синхронизации.

Еще одной особенностью явилось то, что используемый дистрибутив ОС «Эльбрус Линукс 8.0», выбранный в качестве базовой платформы, уже содержит часть пакетов, необходимых для функционирования выбранных версий ROS и ROS 2. Однако в исходных кодах ROS и ROS 2 нередко используются версии библиотек, отличающиеся от предоставляемых в составе дистрибутива. Это может быть обусловлено, например, исторической преемственностью, требованиями совместимости с конкретными релизами и т.д.

В результате возникали конфликты версий библиотек. Простая замена версии системного пакета на требуемую для ROS не всегда допустима, поскольку другие компоненты операционной системы зависят от актуальной версии библиотеки. Для разрешения подобных конфликтов применялся следующий подход:

- установка альтернативной версии библиотеки в изолированный каталог;
- корректировка путей поиска (RPATH, LD_LIBRARY_PATH);
- модификация CMake- и Make-скриптов для явного указания требуемой версии;
- при необходимости – сборка статических версий библиотек.

Аналогичные конфликты наблюдались между зависимостями ROS 1 и ROS 2, использующими различные версии одних и тех же библиотек. Проблема решалась разделением сред сборки и отдельной изоляцией зависимостей с последующей корректной настройкой workspace.

Дополнительной сложностью стала распространенная практика автоматической загрузки зависимостей из сети в процессе сборки. Некоторые пакеты при установке инициировали скачивание исходных кодов сторонних библиотек, патчей, тестовых данных или конфигураций. Часто такой механизм приводил к цепочкам рекурсивных загрузок, когда один скачанный пакет инициировал загрузку других. Поскольку целевая установка предполагается в офлайн-среде, а также с учетом необходимости адаптации всех компонентов под архитектуру «Эльбрус», такой механизм оказался неприемлем.

Была проведена полная трассировка внешних обращений к сетевым ресурсам, после чего все требуемые внешние зависимости были загружены локально, и их исходные коды адаптированы под целевую архитектуру. При этом скрипты сборки были модифицированы для использования исключительно локальных ресурсов. Подобная ситуация, в частности, наблюдалась при работе с пакетами семейства ioseoux.

Дополнительных изменений потребовал пакет log4cxx, который в исходной конфигурации не обеспечивал корректный вывод отладочной информации при запуске ROS-узлов. Наблюдались проблемы с форматированием сообщений, уровнем логирования и выводом в консоль. Проблема была решена путем перекомпиляции библиотеки с корректными флагами, изменением значений по умолчанию для уровней логирования, а также корректировкой конфигурации вывода.

Существенный объем работ был связан с адаптацией скриптов сборки на базе make и CMake. Характерный объем таких скриптов для одного пакета составляет тысячи строк, содержащих многочисленные условные ветвления, проверки платформы и выбор конфигураций.

В среде «Эльбрус» используется собственный оптимизирующий компилятор, совместимый с GCC на уровне интерфейса, но имеющий особенности в наборе поддерживаемых флагов, модели оптимизации и генерации кода. Кроме того, различные аппаратные платформы (2C3, 8C2) требуют корректировки параметров компиляции и линковки.

В скриптах сборки нередко присутствовали проверки архитектуры вида if (CMAKE_SYSTEM_PROCESSOR STREQUAL "x86_64"), фиксированные наборы флагов оптимизации для SSE/AVX, архитектурно-зависимые пути к библиотекам, «магические числа», отражающие особенности изначально поддерживаемых платформ.

Также была проведена адаптация setup-скриптов среды ROS. Setup-скрипты предназначены для инициализации рабочего пространства (workspace). Скрипты обеспечивают настройку переменных окружения (PATH, LD_LIBRARY_PATH, PYTHONPATH и др.), регистрации путей к пакетам (ROS_PACKAGE_PATH), конфигурации среды сборки и выполнения в соответствии с особенностями выполненных реализаций и отличий от предусмотренных в исходных кодах.

Изменения потребовались как при сборке из исходных кодов, так и при установке из бинарных deb-пакетов, поскольку в ОС «Эльбрус» структура каталогов установки по умолчанию отличается от Debian/Ubuntu. Были скорректированы пути к библиотекам, Python-модулям и исполняемым файлам, а также обеспечена корректная работа workspace.

Для каждой аппаратной платформы были разработаны тестовые примеры и проверочные сценарии, позволяющие после установки выполнить контроль работоспособности среды. Тесты включали запуск базовых узлов и обмен сообщениями, проверку работы DDS-слоя, тестирование взаимодействия ROS 1 и ROS 2 через bridge, проверку многопоточной обработки данных и т.д.

С учетом вышеуказанных проблем и путей их решения был разработан экспериментальный образец связующего программного обеспечения на базе ROS 1 Noetic и ROS 2 Galactic для АПП «Эльбрус», функционирующий в двух режимах – нативного исполнения и бинарной трансляции.

Экспериментальные исследования разработанного связующего программного обеспечения на АПП «Эльбрус». Экспериментальные исследования разработанного экспериментального образца проводились с целью подтверждения корректности функционирования всех механизмов, оценки совместимости двух версий фреймворка при использовании `ros1_bridge`, проверки работы в гетерогенной вычислительной системе, сравнения производительности нативного исполнения и режима бинарной трансляции, а также для подтверждения состоятельности предложенного подхода по унификации связующего программного обеспечения РТК за счет использования двух режимов работы ROS.

Тестирование выполнялось на ВК, включающем два вычислительных модуля (ВМ) на основе «Эльбрус-2С3» и «Эльбрус-8СВ» под управлением ОС «Эльбрус Линукс 8.0», объединённых в сеть и имитирующих БВС РТК, структура которого представлена на рис. 5.

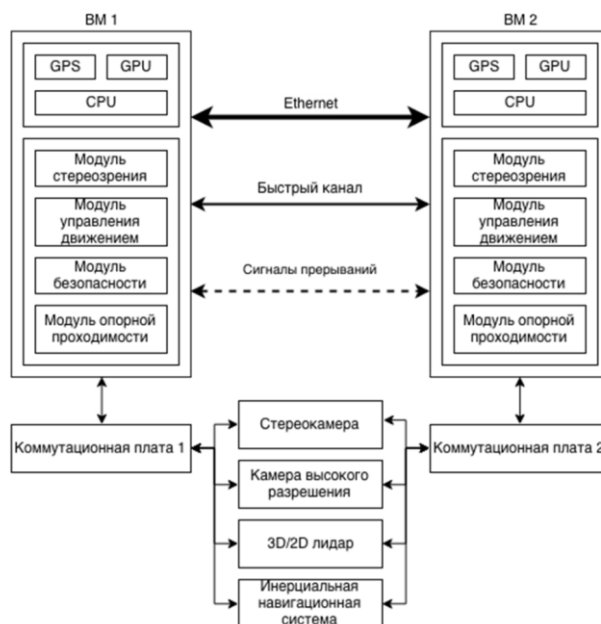


Рис. 5. Структура вычислительного комплекса

В ходе испытаний были реализованы и проанализированы несколько вариантов развёртывания программной среды, отличающихся режимами исполнения и распределением вычислительной нагрузки.

Первый вариант предусматривал запуск ROS 1 и ROS 2 в среде бинарной трансляции на одном вычислительном модуле «Эльбрус». В данной конфигурации вся программная экосистема функционировала как совокупность транслируемых x86-приложений в пределах единой операционной среды. Схема запуска представлена на рис. 6 слева.

Второй вариант представлял собой смешанный режим функционирования, при котором ROS 1 запускался в нативном режиме, ROS 2 – через бинарный транслятор. В данном случае для корректного функционирования потребовалась дополнительная настройка сети для ROS 2. Схема запуска представлена на рис. 6 справа.

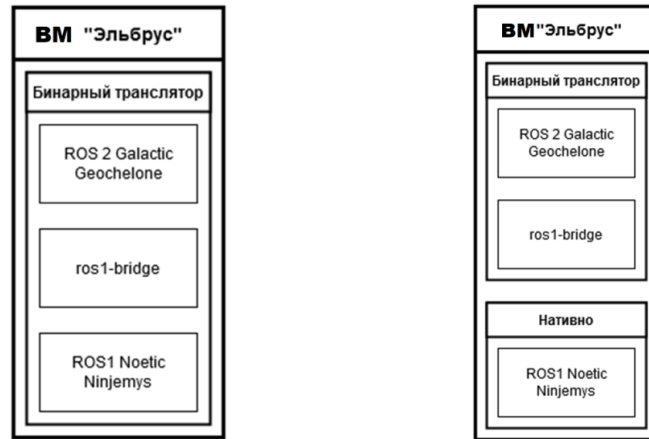


Рис. 6. Схема 1 запуска ROS 1, ROS 2 (слева), схема 2 запуска ROS 1, ROS 2 (справа)

Третий вариант включал в себя распределённую конфигурацию, в которой узлы ROS 1 и ROS 2 размещались на различных VM из состава ВК. Рассматривался вариант, когда оба вычислительных комплекса работали под бинарной трансляцией, а также сценарии, в котором один из них функционировал нативно. Схемы запуска представлены на рис. 7 сверху и рис. 7 снизу соответственно.

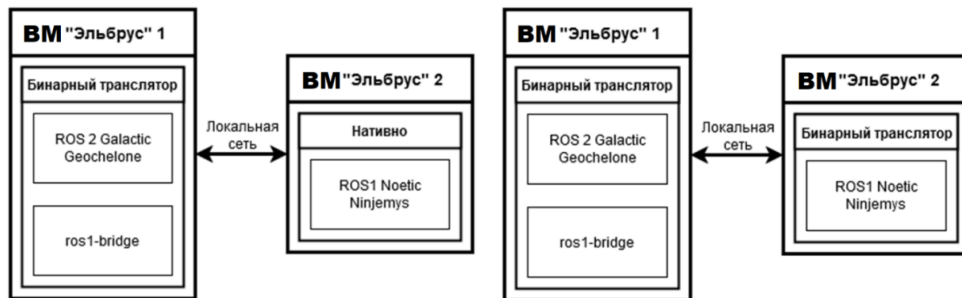


Рис. 7. Схемы 3 запуска ROS 1, ROS 2

Четвёртый вариант включал конфигурации с полностью нативным запуском ROS 1 и ROS 2 как на одном вычислительном комплексе, так и на двух узлах. Схемы запуска представлены на рис. 8 слева и рис. 8 справа соответственно.

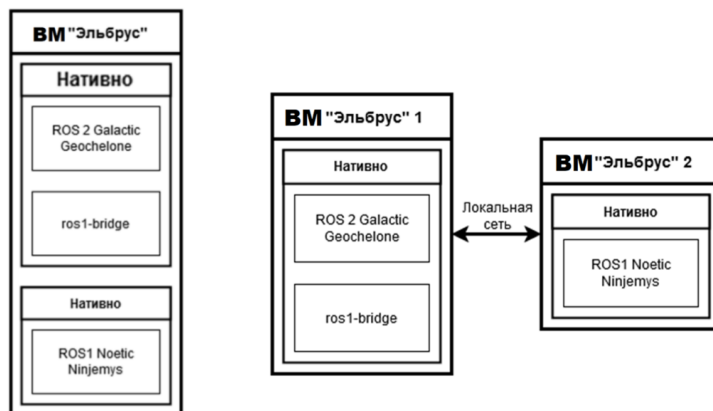


Рис. 8. Схемы 4 запуска ROS 1, ROS 2

Во всех вариантах функциональная проверка включала тестирование механизма публикации и подписки с использованием сообщений различного объёма и структуры. Подтверждена корректность передачи сообщений, отсутствие потерь данных и стабильность передачи при длительном непрерывном функционировании. Дополнительно проверялась работа сервисов и механизмов, включая обработку длительных операций, прерывание задач и повторные вызовы. Подтверждено корректное функционирование `rosl_bridge`, обеспечивающего взаимодействие между ROS 1 и ROS 2.

В ходе тестирования была проведена оценка производительности с точки зрения измерения средней задержки передачи сообщений. Для определения латентности использовалась публикация сообщений с временными метками и вычисление разницы между моментом отправки и получения. Измерения проводились для сообщений малого, среднего и большого объёма. Нативная реализация продемонстрировала меньшие задержки и более стабильные временные характеристики. При использовании бинарного транслятора увеличение задержки составляло в среднем 10-25% в зависимости от размера сообщений. Тесты пропускной способности показали, что нативный режим обеспечивает более высокую устойчивую частоту публикации без потерь данных, а различие производительности достигало 15-20%.

В распределённых конфигурациях проверялась корректность обнаружения узлов в сети, устойчивость маршрутизации сообщений, а также восстановление соединений после кратковременных сетевых разрывов.

Результаты исследований показали, что экспериментальный образец обеспечивает единое информационное пространство для запуска, функционирования и завершения работы программных компонентов РТК. Также экспериментальный образец поддерживает развёртывание (импорт) программного обеспечения РТК, созданного в других программных средах, и обеспечивает функциональную совместимость с ROS Noetic Ninjemys и ROS 2 Galactic Geochelone.

Таким образом, проведённое тестирование подтвердило корректность функционирования портированных версий ROS 1 и ROS 2, возможность их совместного использования, устойчивость работы в распределённой гетерогенной среде и применимость платформы «Эльбрус» для реализации современных робототехнических комплексов.

Заключение. В данной работе проведено исследование по унификации связующего программного обеспечения РТК на базе ROS 1 Noetic Ninjemys и ROS 2 Galactic Geochelone на отечественной АПП «Эльбрус» с использованием двух подходов: бинарной трансляции уровня приложений и полностью нативной сборки исходных кодов.

Проведён анализ зависимостей, адаптация архитектурно-зависимых компонентов, модификация сценариев сборки и формирование установочных пакетов с использованием кросскомпиляции, соответствующих требованиям АПП «Эльбрус». Реализованная программная среда обеспечивает функционирование обеих версий ROS как отдельно, так и совместно с использованием `rosl_bridge`, что позволяет поддерживать существующие решения на ROS 1 и одновременно развивать новые разработки на базе ROS 2 на отечественной аппаратной платформе.

Проведённые экспериментальные исследования в различных конфигурациях, включая запуск на одном вычислительном модуле, в смешанном режиме исполнения и в распределённой схеме с двумя вычислительными модулями, подтвердило корректность функционирования программных сред ROS 1 и ROS 2 и функциональную совместимость с программным обеспечением, созданным на других аппаратных архитектурах. Анализ показал, что нативная реализация обеспечивает снижение задержек передачи сообщений и прирост производительности порядка 15-20 % по сравнению с использованием бинарной трансляции при сохранении функциональной эквивалентности, однако режим бинарной трансляции обеспечивает более высокий уровень совместимости и переносимости программных средств между процессорами Эльбрус с разной версией архитектуры системы команд.

Практическая значимость работы заключается в расширении инструментальной базы разработки систем управления РТК на российской АПП «Эльбрус».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Суминов К.А., Бочаров Н.А., Кирилюк М.А.* Оценка аппаратного состава бортовых вычислительных систем робототехнических комплексов на основе решаемых задач // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2025. – № 2 (244). – С. 279-289. – DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-279-289. – EDN QLGORV.
2. *Тачков А.А., Козов А.В., Вуколов А.Ю.* Особенности портирования Robot Operating System на программно-аппаратную платформу «Эльбрус» // Программные продукты и системы. – 2019. – № 4. – С. 655-664. – EDN TVJSXJ.
3. *Чучко П.А., Бычков И.Н., Панченко Е.Г.* Проблема унификации модулей на основе процессора «Эльбрус-2С3» // Наноиндустрия. – 2022. – Т. 15, № S8-1 (113). – С. 37-38. – DOI 10.22184/1993-8578.2022.15.s8.37.38.
4. *Бочаров Н.А., Гладких А.С., Парамонов Н.Б., Сенченков С.В.* Возможности микропроцессоров Эльбрус-8С и Эльбрус-8СВ для решения задач робототехники // Роботизация Вооружённых Сил Российской Федерации: Сб. статей V военно-научной конференции, Анапа, 29–30 июля 2020 года. Т. 1. – Анапа: Федеральное государственное автономное учреждение. – 2020. – С. 1-10.
5. *Гилязов С.С., Кравцов Е.М., Пантелеев П.В.* Оптимизация ядра ОС Linux для архитектуры «Эльбрус» с поддержкой Numa // Вопросы радиоэлектроники. – 2011. – Т. 4, № 3. – С. 60-69. – EDN NZHDAV.
6. *Бурдинский И.Н., Карабанов И.В., Миронов А.С.* Применение бортовой системы DUNE в качестве базового программного обеспечения узлов сенсорной сети акватории // Вестник ТОГУ. – 2016. – № 3 (42). – С. 13-22.
7. *Гуляшикин А.А., Соколов Н.А.* Использование robot operating system для моделирования захвата известного объекта в известных условиях // Политехнический молодежный журнал. – 2021. – № 5 (58). – DOI 10.18698/2541-8009-2021-5-697. – EDN LSKHPM.
8. *Калянов А.А.* Применение robot operating system для разработки программного обеспечения роботов // Научные исследования и разработки молодых ученых: Матер. научно-практической конференции аспирантов и молодых ученых, посвященной Дню аспиранта, Ульяновск, 20 января 2023 года / под ред. д-ра физ.-мат. наук, профессора В.Н. Голованова. – Ульяновск: Ульяновский государственный университет, 2023. – С. 303-306. – EDN MXZXQX.
9. Noetic Ninjemys: The Last Official ROS 1 Release / Open robotics. – URL: <https://www.openrobotics.org/blog/2020/5/23/noetic-ninjemys-the-last-official-ros-1-release> (дата обращения: 25.02.2026).
10. *Quigley M., Gerkey B., Smart W.D.* Programming Robots with ROS: a practical introduction to the Robot Operating System. – O'Reilly Media, Inc., 2015.
11. *Bradski G., Kaehler A.* Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library. – O'Reilly Media, Inc., 2008.
12. *Rusu R. B., Cousins S.* 3d is here: Point cloud library (pcl) // 2011 IEEE international conference on robotics and automation. – IEEE, 2011. – С. 1-4.
13. Package from naoqi_libqi repo. – URL: <https://index.ros.org/p> (дата обращения 25.02.2026).
14. *Ozansoy C.R., Zayegh A., Kalam A.* The real-time publisher/subscriber communication model for distributed substation systems // IEEE transactions on power delivery. – 2007. – Vol. 22, No. 3. – P. 1411-1423.
15. *Macenski S. et al.* Robot operating system 2: Design, architecture, and uses in the wild // Science robotics. – 2022. – Vol. 7, No. 66. – С. eabm6074.
16. Version 2 of the Robot Operating System (ROS) software stack. – URL: <https://github.com/ros2> (дата обращения: 25.02.2026).
17. Getting Started. Where to get started with ROS 2. – URL: <https://www.ros.org/blog/getting-started> (дата обращения: 25.02.2026).
18. *Pardo-Castellote G.* Omg data-distribution service: Architectural overview // 23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2003. Proceedings. – IEEE, 2003. – P. 200-206.
19. *Воронов Н.В., Гимпельсон В.Д., Маслов М.В. [и др.].* Система динамической двоичной трансляции x86 → «Эльбрус» // Вопросы радиоэлектроники. – 2012. – Т. 4, № 3. – С. 89-108. – EDN OUMJOF.
20. Операционные системы «Эльбрус». – URL: http://www.mcst.ru/Elbrus_OS (дата обращения: 25.02.2026).
21. *Бочаров Н.А.* Исследование подходов к унификации бортовых вычислительных комплексов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 1 (231). – С. 275-287. – DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-275-287. – EDN AIYGIE.
22. Руководство по эффективному программированию на платформе «Эльбрус». – URL: http://mcst.ru/doc/elbrus_prog/elbrus-prog-1.2_2024-02-28.pdf (дата обращения: 25.02.2026).

REFERENCES

1. Suminov K.A., Bocharov N.A., Kirilyuk M.A. Otsenka apparatnogo sostava bortovykh vychislitel'nykh sistem robototekhnicheskikh kompleksov na osnove reshaemykh zadach [Evaluation of the hardware composition of on-board computing systems of robotic complexes based on the tasks to be solved], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2025, No. 2 (244), pp. 279-289. DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-279-289. EDN QLGORV.
2. Tachkov A.A., Kozov A.V., Vukolov A.Yu. Osobennosti portirovaniya Robot Operating System na programmno-apparatnuyu platformu «El'brus» [Features of porting Robot Operating System to the El-brus hardware and software platform], *Programmnye produkty i sistemy* [Software Products and Systems], 2019, No. 4, pp. 655-664. EDN TVJSXJ.
3. Chuchko P.A., Bychkov I.N., Panchenko E.G. Problema unifikatsii moduley na osnove protsessora «El'brus-2S3» [The problem of unification of modules based on the Elbrus-2S3 processor], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2022, Vol. 15, No. S8-1 (113), pp. 37-38. DOI 10.22184/1993-8578.2022.15.8s.37.38.
4. Bocharov N.A., Gladkikh A.S., Paramonov N.B., Senchenkov S.V. Vozmozhnosti mikroprotsessorov El'brus-8S i El'brus-8SV dlya resheniya zadach robototekhniki [Capabilities of Elbrus-8S and Elbrus-8SV microprocessors for solving robotics problems], *Robotizatsiya Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii: Sb. statey V voenno-nauchnoy konferentsii, Anapa, 29–30 iyulya 2020 goda* [Robotization of the Armed Forces of the Russian Federation: Collection of articles of the V military-scientific conference, Anapa, July 29-30, 2020]. Vol. 1. Anapa: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe uchrezhdenie.
5. Gilyazov S.S., Kravtsunov E.M., Panteleev P.V. Optimizatsiya yadra os Linux dlya arkhitektury «El'brus» s podderzhkoy Numa [Optimization of the Linux kernel for the Elbrus architecture with Numa support], *Voprosy radioelektroniki* [Questions of Radio Electronics], 2011, Vol. 4, No. 3, pp. 60-69. EDN NZHDAV.
6. Burdinskiy I.N., Karabanov I.V., Mironov A.S. Primenenie bortovoy sistemy DUNE v kachestve bazovogo programmno obespecheniya uzlov sensornoy seti akvatorii [Application of the onboard DUNE system as basic software for the nodes of the water area sensor network], *Vestnik TOGU* [Bulletin of the Pacific National University], 2016, No. 3 (42), pp. 13-22.
7. Gul'nyashkin A.A., Sokolov N.A. Ispol'zovanie robot operating system dlya modelirovaniya zakhvata izvestnogo ob'ekta v izvestnykh usloviyakh [Using a robot operating system to simulate the capture of a known object under known conditions], *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal* [Polytechnic Youth Journal], 2021, No. 5 (58). DOI 10.18698/2541-8009-2021-5-697. EDN LSKHPM.
8. Kalyanov A.A. Primenenie robot operating system dlya razrabotki programmno obespecheniya robotov [Application of robot operating system for developing robot software], *Nauchnye issledovaniya i razrabotki molodykh uchenykh: Mater. nauchno-prakticheskoy konferentsii aspirantov i molodykh uchenykh, posvyashchennoy Dnyu aspiranta, Ul'yanovsk, 20 yanvarya 2023 goda* [Scientific research and development of young scientists: Proceedings of the scientific and practical conference of graduate students and young scientists dedicated to the Postgraduate Day, Ulyanovsk, January 20, 2023], ed. by dr. of phys. and math. sc., professor V.N. Golovanova. Ul'yanovsk: Ul'yanovskiy gosudarstvennyy universitet, 2023, pp. 303-306. EDN MXZXQX.
9. Noetic Ninjemys: The Last Official ROS 1 Release, Open robotics. Available at: <https://www.openrobotics.org/blog/2020/5/23/noetic-ninjemys-the-last-official-ros-1-release> (accessed 25 February 2026).
10. Quigley M., Gerkey B., Smart W.D. Programming Robots with ROS: a practical introduction to the Robot Operating System. O'Reilly Media, Inc., 2015.
11. Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library. O'Reilly Media, Inc., 2008.
12. Rusu R. B., Cousins S. 3d is here: Point cloud library (pcl), *2011 IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE, 2011, pp. 1-4.
13. Package from naoqi_libqi repo. Available at: <https://index.ros.org/p> (accessed 25 February 2026).
14. Ozansoy C.R., Zayegh A., Kalam A. The real-time publisher/subscriber communication model for distributed substation systems, *IEEE transactions on power delivery*, 2007, Vol. 22, No. 3, pp. 1411-1423.
15. Macenski S. et al. Robot operating system 2: Design, architecture, and uses in the wild, *Science robotics*, 2022, Vol. 7, No. 66, pp. eabm6074.
16. Version 2 of the Robot Operating System (ROS) software stack. Available at: <https://github.com/ros2> (accessed 25 February 2026).
17. Getting Started. Where to get started with ROS 2. Available at: <https://www.ros.org/blog/getting-started> (accessed 25 February 2026).

18. Pardo-Castellote G. Omg data-distribution service: Architectural overview, *23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2003. Proceedings*. IEEE, 2003, pp. 200-206.
19. Voronov N.V., Gimpel'son V.D., Maslov M.V. [et al.]. Sistema dinamicheskoy dvoichnoy translyatsii x86 → «El'brus» [Dynamic binary translation system x86 → "Elbrus"], *Voprosy radioelektroniki* [Questions of radio electronics], 2012, Vol. 4, No. 3, pp. 89-108. EDN OUMJOF.
20. Operatsionnye sistemy «El'brus» [Elbrus operating systems]. Available at: http://www.mcst.ru/Elbrus_OS (accessed 25 February 2026).
21. Bocharov N.A. Issledovanie podkhodov k unifikatsii bortovykh vychislitel'nykh kompleksov [Study of approaches to the unification of onboard computing systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 1 (231), pp. 275-287. DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-275-287. – EDN AIYGIE.
22. Rukovodstvo po effektivnomu programmirovaniyu na platforme «El'brus» [Guide to effective programming on the Elbrus platform]. Available at: http://mcst.ru/doc/elbrus_prog/elbrus-prog-1.2_2024-02-28.pdf (accessed 25 February 2026).

Бочаров Никита Алексеевич – ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; г. Москва, Россия; тел.: +79167346437; д.т.н.; зам. руководителя управления – главный научный сотрудник.

Суминов Константин Александрович – ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»; e-mail: suminov_k@ineum.ru; 119334, г. Москва, Россия; тел.: +74991355336; к.т.н.; начальник отдела.

Кириллук Михаил Андреевич – ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»; e-mail: kirilyuk_m@ineum.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79055273011; к.т.н.; начальник отдела.

Парамонов Николай Борисович – ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»; e-mail: paramon_n@ineum.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74991355336; д.т.н.; профессор; руководитель управления.

Bocharov Nikita Alekseevich – JSC «INEUM»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; Moscow, Russia; phone: +79167346437; dr. of eng. sc.; deputy head of division – chief researcher.

Suminov Konstantin Aleksandrovich – JSC «INEUM»; e-mail: suminov_k@ineum.ru; Moscow, Russia; phone: +74991355336; cand. of eng. sc.; head of department.

Kirilyuk Mikhail Andreevich – JSC «INEUM»; e-mail: kirilyuk_m@ineum.ru; Moscow, Russia; phone: +79055273011; cand. of eng. sc.; head of department.

Paramonov Nikolay Borisovich – JSC «INEUM»; e-mail: paramon_n@ineum.ru; Moscow, Russia; phone: +74991355336; dr. of eng. sc.; professor; head of division.

УДК 004.853

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-271-285

И.С. Фомин, А.А. Базельцев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ КАМЕР КРУГОВОГО ОБЗОРА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Рассматривается проблема обеспечения безопасности движения мобильной робототехнической платформы в окружении с известными классами объектов на основе результатов обнаружения объектов по системе камер кругового обзора. Хорошо известны решения по обеспечению безопасности по камерам с использованием оптических потоков или иных способов выделения подвижных объектов в поле зрения. Здесь предлагается использовать для обеспечения безопасности положение и форму объектов, рассчитанные по результатам работы нейросетевого детектора. Система кругового обзора (СКО) состоит из 4 камер с широким углом зрения. Рассмотрены несколько подходов к подаче объектов в нейросетевой детектор. Показаны различия по качеству и быстродействию для этих подходов, сформированы методические рекомендации по использованию. Для расчета положений объектов в системе координат камер и через положения камер – в СК робота – предложены 2 решения на основе калибровки камер и некоторых допущений. В первом случае положение робота на поверхности принимается за горизонтальное, а высота камеры над поверхностью – постоянной и известной, а во втором – предварительно известным принимается один метрический размер объекта для каждого класса. Предложенное решение

развернуто и протестировано на вычислителе на базе Rockchip 3588 и показывает высокие результаты по количеству обнаружений (от 8 до 19 объектов в среднем на кадр в зависимости от настроек), и быстродействию (0,29 с для 8 объектов на кадр и около 1,05 с для результата в 19 объектов на кадр). С точки зрения точности определения дистанции до объектов, то для первого способа стандартное отклонение составило от 4,2 до 7,9 мм, для второго - от 3,8 до 7,6 мм. Устойчивость оценки размеров объектов для первого способа от 0,64 до 2,02 мм, для второго от 1,63 до 2,22 мм соответственно. Полученные результаты позволяют уверенно утверждать, что предложенный алгоритм обнаружения объектов применим для обеспечения безопасности и навигации мобильного робота с использованием камер системы кругового обзора.

Обнаружение объектов; обеспечение безопасности; система кругового обзора; встраиваемый вычислитель; YOLO.

I.S. Fomin, A.A. Baseltsev

APPLICATION OF A SURROUND-VIEW CAMERA SYSTEM FOR MOBILE ROBOT MOVEMENT SAFETY

This paper addresses the problem of ensuring the motion safety of a mobile robotic platform in an environment with known object classes, based on object detection results from a surround-view camera system. While solutions based on optical flow or other methods for detecting moving objects in a camera's field of view are well-known, this work proposes to use the results from a dedicated object detector for safety assurance. Here, we propose to utilize object positions, calculated from the output of a neural network detector, for safety purposes. The surround-view camera system (SVS) consists of 4 cameras with wide-angle lenses. Several approaches for feeding objects into the neural network detector are considered. Differences in quality and performance for these approaches are demonstrated, and methodological recommendations for their use are formulated. To calculate object positions in the camera coordinate system and, through camera positions, in the robot's coordinate frame, 2 solutions based on camera calibration and certain assumptions are proposed. In the first case, the robot's position on the surface is assumed to be horizontal, and the camera's height above the surface is assumed constant and known. In the second case, one of the metric dimensions of objects for each class are assumed to be known in advance. The proposed solution has been deployed and tested on a Rockchip 3588-based computing platform, demonstrating high performance in terms of detection count (from 8 to 19 objects per frame on average, depending on settings) and processing speed (0.29 s for 8 objects per frame and about 1.05 s for the result of 19 objects per frame). Regarding the accuracy of distance estimation to objects, for the first method, the standard deviation ranged from 4.2 to 7.9 mm, and for the second method, from 3.8 to 7.6 mm. The standard deviation of object size estimation for the first method ranged from 0.64 to 2.02 mm, and for the second method from 1.63 to 2.22 mm, respectively. The obtained results allow us to confidently state that the proposed object detection algorithm is applicable for ensuring the safety and navigation of a mobile robot using surround-view system cameras.

Object detection; movement safety; surround-view camera system; embedded computing platform; YOLO.

Введение. Задача обнаружения объектов и определения их положения в окружении мобильного транспортного средства является хорошо известной и давно решаемой в задаче обеспечения безопасности при автовождении. В частности, есть решения на основе оптических потоков, которые предлагались в том числе и в ЦНИИ РТК [1]. Основной способ решения задачи обеспечения безопасности крупных транспортных средств сейчас – использование одного или нескольких 3D LiDAR для оценки препятствий по всем угрозам направлениям [2]. Это хорошо работающий подход, но он требует существенных вычислительных затрат, которые можно легко позволить себе при разработке крупногабаритного или среднегабаритного мобильного робота или транспортного средства [3–5], где допустим мощный вычислитель с высоким энергопотреблением или обмен данными для обработки на серверах.

В наземной сервисной мобильной робототехнике крайне важны автономность и низкое энергопотребление, поэтому решение задачи обеспечения безопасности для них предполагает использование сенсоров и вычислителей с низким энергопотреблением, осуществление всех расчетов на борту мобильного робота и наличие минимальных априорных знаний о том окружении, в котором роботу предстоит работать. Так как для

управления оператором мобильный робот уже оснащается системой камер кругового обзора, разумно использовать ее для автоматического обнаружения препятствий и оценки расстояния до них с целью обеспечения безопасности перемещения.

Важной особенностью является использование камер с широким или сверхшироким углом обзора, что приводит к существенным дисторсионным искажениям изображения. Это требует применения специальных алгоритмов калибровки камеры [6], обработки результатов обнаружения для компенсации дисторсионных искажений и построения особых алгоритмов расчета расстояния и оценки формы объектов с учетом того, что с достаточной точностью можно измерить только угол направления на объект относительно вектора оптической оси.

Постановка задачи. Основной целью данной работы является задача обнаружения потенциально опасных объектов при автономном движении малоразмерного мобильного робота, оснащенного системой широкоугольных камер для обеспечения кругового обзора и маломощным встраиваемым вычислителем. Для обеспечения безопасности необходимо решить задачи обнаружения объектов с достаточными быстродействием, точностью и полнотой, а также устойчивого вычисления расстояния до объектов и определения их размеров по камерам с сильными дисторсионными искажениями в монокулярной постановке.

На решение задачи обнаружения объектов накладывается ряд существенных ограничений. Для расчета нейронных сетей наилучшим решением являются встраиваемые вычислители на базе Nvidia, но из-за недоступности к свободному приобретению их использование невозможно. Выбран вычислитель Orange Pi 5 Ultra с встроенным модулем тензорных вычислений TPU, построенный на базе процессора Rockchip 3588. Для использования на данном вычислителе требуется перевод нейронной сети в обобщенный формат ONNX и последующая компиляция весов в специальный формат RKNN. Это накладывает существенные ограничения на доступный набор моделей (общим местом является применение сетей семейства YOLO [7], обученных на больших наборах данных [8]). Требуется провести анализ существующих моделей по соотношению качества и быстродействия и выбрать наиболее подходящую с учетом ограничений вычислителя. Доступный объем памяти ограничивает размер входа модели, поэтому необходимо разработать подход к обработке, оптимальный с точки зрения соотношения быстродействия, точности и полноты обнаружений.

Для решения задачи вычисления расстояния до объектов и оценки их размеров требуется разработать специальные алгоритмы. Традиционно используются подходы на базе стереокамер или камер глубины с неширокими углами обзора. В силу использования монокулярной камеры с широким углом обзора требуется разработать специфические алгоритмы расчета дистанции на основе доступной информации. В работе предлагается два алгоритма, опирающиеся на параметры внутренней калибровки, априорную информацию о геометрии робота и его расположении относительно поверхности в первом случае и априорные данные о характерных геометрических размерах для определенных классов объектов во втором случае.

Существующие системы кругового обзора и алгоритмы калибровки широкоугольных камер. Так как для оператора будет в том числе формироваться панорамное изображение, конфигурация и параметры камер должны это учитывать. Рассмотрим существующие подходы к формированию панорам.

Первый известный подход основан на использовании одной сверхширокоугольной камеры, направленной вертикально вверх [9], он широко применяется в системах наблюдения или роботах-пылесосах. Главным недостатком такой СКО является небольшой угол обзора по вертикали и полное отсутствие зон стереоскопии при использовании моноскопической камеры, из-за этого – невозможность получения истинной глубины. Есть модификации с использованием отражающего элемента, также компактные и имеющие больший угол обзора по вертикали [10], они используются в системах автовождения [11] и на мобильных роботах [12]. К существенным недостаткам данного варианта системы можно отнести использование зеркала: камера при ярком источнике света с одной стороны робота получает блики на весь кадр, в связи с чем не происходит фиксации пригодного

го к анализу изображения. Второй подход к формированию панорамы на основе одной камеры – использование монокулярной камеры с поворотным механизмом. Для получения данных роботу с такой системой необходимо останавливаться через небольшие промежутки времени, получать панораму окружения и проводить сопоставление кадров. Такой алгоритм сильно снижает эффективность системы безопасности и допустимую скорость робота, а также повышает потребление питания. Пример использования такой системы – камеры WAC марсохода EхoMars [13].

Второй способ формирования панорамного изображения основан на использовании системы из нескольких камер. С одной стороны, это позволяет существенно улучшить обзор препятствий вокруг робота и повысить качество получаемых изображений, а с другой – вносит дополнительные сложности с синхронизацией видеопотоков с различных камер, особенно при построении оценок положений объектов в движении и при поворотах. Примеры таких панорамных систем можно увидеть в работах [14], или [15], где рассматриваются проблемы сшивки объектов на разных дистанциях с учетом параллакса. Важный недостаток таких систем – возрастание энергопотребления с увеличением количества камер, и кратный рост вычислений, которые требуются для обработки нескольких кадров. Частично борьба с ним посвящена и данная работа.

Необходимо отметить также существование сложных систем кругового обзора, которые используют несколько камер различного типа, в том числе с зеркалами [16], пусть они и не являются предметом рассмотрения данной работы.

Как для сшивки панорамного изображения, так и для вычисления положения объекта в поле зрения по одной камере требуется решение задачи калибровки камеры широкого угла обзора и взаимной юстировки камер системы кругового обзора. Методы калибровки широкоугольных и сверхширокоугольных камер можно условно разделить на методы «самокалибровки» и фотограмметрической калибровки. При самокалибровке предполагается оценка внутренних параметров камеры на основе нескольких кадров, полученных путем перемещения камеры в статической сцене [17], однако такие подходы требуют сложных вычислений и выполнения многих условий, а также плохо применимы для калибровки многокамерных систем. Обычно используется фотограмметрическая калибровка, основанная на получении и анализе изображений с различными калибровочными паттернами. На основании большого количества снимков одного и того же паттерна, расположенного в разных частях кадра под разным углом к статической камере, можно получить связь между 2D картинкой и реальным миром. Паттерны всегда имеют известную геометрию и бывают различного типа. Широкое распространение получили паттерны на основе легко детектируемых примитивов. Известны паттерны типа «шахматная доска» [18] и круговой паттерн [19]. Процедура калибровки включает в себя получение кадров с паттерном, обнаружение особых точек и расчет их пиксельных координат, получение начального приближения калибровки и вычисление параметров камеры как результата решения системы уравнений посредством минимизации фотограмметрической ошибки. Различия в методах калибровки состоят в основном в используемых уравнениях. Для камер с широким углом зрения общепринятыми являются модели калибровки Скарамужза (D. Scaramuzza) [6] и Канналы-Брандта (J. Kannala, S.S. Brandt) [20]. Модель Скарамужза предназначена для калибровки только широкоугольных и сверхширокоугольных камер. Отличительной особенностью модели является использование разложенного полинома в ряд Тейлора для получения коэффициентов внутренних параметров. Модель используется для сложных систем, например, катадиоптрических камер или камер с углом обзора больше 180°. Данный метод реализован в программной среде Matlab. Модель Канналы-Брандта является универсальной и применяется для калибровки камер с различным углом обзора. Отличительной чертой модели является использование радиально-симметричного полинома для вычисления внутренних параметров. Данный метод требует достаточно большого количества кадров для калибровки. Модель используется в библиотеке OpenCV для калибровки широкоугольных камер. В работе для получения параметров камер использовалась калибровка фотограмметрическим методом с использованием паттерна шахматной доски и модель Скарамужза.

Обзор алгоритмов обнаружения объектов. Также необходимо дать краткую характеристику существующих алгоритмов обнаружения объектов. Для обнаружения объектов на изображениях используются одноэтапные и двухэтапные нейросетевые детекторы. Выбор подхода зависит от требований к скорости, точности и устойчивости алгоритма к различным условиям, включая наличие мелких объектов, сложный фон и др.

Одноэтапные детекторы выполняют обнаружение за один прямой проход через сеть, что обеспечивает высокую скорость и делает их подходящими для задач обнаружения в реальном времени. Например, SSD (Single Shot Detector) [21] предсказывает объекты на разных масштабах карты признаков, что ускоряет работу, но снижает точность при наличии объектов малого размера. CenterNet [22] вместо прямого предсказания использует тепловые карты, где каждая точка обозначает центр объекта, а его размеры и смещения уточняются отдельно – это повышает точность и устойчивость к шуму. RetinaNet [23] справляется с несбалансированностью классов благодаря фокальной функции потерь (focal loss), снижая влияние фоновых областей и повышая качество предсказаний. EfficientDet [24] использует легковесную архитектуру EfficientNet и эффективную схему объединения признаков (BiFPN), обеспечивая хорошее соотношение точности и скорости. YOLO (You Only Look Once) [25] проводит одновременное предсказание координат и классов объектов на изображении, благодаря чему остаётся одним из самых быстрых и популярных решений для детекции в реальном времени.

Двухэтапные детекторы сначала формируют регионы-кандидаты (region proposals), а затем классифицируют и уточняют их, что повышает точность, особенно при обнаружении мелких, перекрытых или слабо выраженных объектов. Faster R-CNN [26] – классический пример такого подхода, в котором Region Proposal Network выделяет потенциальные области, после чего отдельная сеть классифицирует содержимое и уточняет границы. Это обеспечивает высокую точность локализации, но снижает скорость обработки. Mask R-CNN [27] дополняет Faster R-CNN дополнительным выходом для предсказания маски сегментации, позволяя выделять точную форму объекта, что особенно полезно в медицинских или промышленных задачах. Более современный Sparse R-CNN [28] отказывается от полного перебора регионов и использует ограниченное количество обучаемых предположений, которые адаптируются в процессе обучения, повышая производительность модели.

Использованная модель сети обнаружения объектов. Большинство представленных моделей отличаются тем, что используют в той или иной степени нестандартные слои, оригинальные способы формирования функции ошибки и т.д., откуда следует обычно невозможность их использования на вычислителях, которые не относятся к семейству Nvidia. Несмотря на достаточно широкую номенклатуру строительных единиц архитектур в формате ONNX [29], большинство авторов не прилагают усилий по адаптации архитектур к переносу в этот формат, и далее, через него в аппаратно ускоряемые форматы. Фактически из всех рассмотренных выше архитектур перенос на вычислитель RK3588 допускают только модели семейства YOLO. Именно модель этого семейства YOLOv8m была выбрана для экспериментов. Что касается более современных версий YOLO – v11, v12 [30] – они были проверены, но не были использованы, т.к. для них на момент проведения экспериментов отсутствовали веса, обученные на OpenImages, а стандартные веса на 80 классов не отвечали требованиям задачи (принципиально не обнаруживали часть требуемых по условиям объектов). Практическое сравнение качества на видео с используемых в экспериментах камер не показало явного преимущества старших версий перед v8m, поэтому были использованы веса YOLOv8m, обученные на наборе данных OpenImages v7 [8] и преобразованные в формат RK3588 с использованием фреймворка Ultralytics [31]. Для запуска модели непосредственно на борту вычислителя использовался фреймворк ezrknn-toolkit2 [32].

Разработанные подходы к обработке данных нескольких камер. Обработка данных с нескольких камер кратно увеличивает время обнаружения объектов по сравнению с одной камерой. Для обработки данных с системы кругового обзора предложено несколько различных подходов. Общее для всех подходов – захват с камер выполняется в

отдельных узлах ROS2, после чего к изображениям можно обращаться в других узлах через топики изображений. В узле обработки данных с камер захват изображений из топиков осуществляется в асинхронном режиме с искусственной многопоточностью. Полученные изображения помещаются в переменные для обработки через блокировку. Размер очереди в 1 элемент позволяет получать самое актуальное изображение сразу, как только завершена работа по извлечению предыдущего. Изображения, поступившие во время извлечения, пропускаются. При обработке одновременно извлекаются и обрабатываются самые актуальные изображения на момент начала итерации работы потока обработки. Все это в совокупности позволяет получить максимально синхронизированные и актуальные данные на момент обработки.

При обработке данных с камер СКО были рассмотрены несколько подходов. Результаты их сравнения показаны в табл. 1. Самый простой – последовательный вызов нейронной сети, рассчитанной на обработку одного изображения, для каждого из изображений со всех камер. Более сложный подход – объединение 4 изображений с камер в пачку и использование нейронной сети, сконфигурированной для единовременной обработки пачки из 4-х изображений. Несмотря на то, что предполагалось, что такой подход будет быстрее, на практике он показал себя даже медленнее, чем последовательная обработка. Это связано с нехваткой ресурсов у TPU для одновременного вычисления пачки целиком. Также рассматривался вариант с объединением 4-х изображений с камер в одно изображение и подача такого объединенного изображения на нейронную сеть, рассчитанную на обработку одной картинки (по сетке 2×2 , т.е. каждая картинка при обработке вдвое меньше), или на нейронную сеть, рассчитанную на обработку кадра вдвое большего размера (каждое изображение обрабатывается без уменьшения). Вдвое меньшие изображения ожидаемо обрабатываются в 4 раза быстрее, но существенно снижается количество выделяемых объектов. На вдвое большем разрешении падения качества не происходит, но время обработки превышает время покадровой обработки и обработки пачкой. Таким образом, на момент написания статьи основным способом была выбрана покадровая обработка.

Таблица 1

Результаты оценки быстродействия разных вариантов обработки

Тип	Кадр	Средн., с	σ , с	Мин., с	Макс, с	Обнар.
2x2	320p	0,29	0,02	0,2525	0,3828	83
2x2	640p	1,3	0,03	1,2296	1,4047	160
4 пачка	640p	1,1	0,03	1,0397	1,32	190
4 послед.	640p	1,05	0,05	0,9325	1,198	191

Математическая модель камеры Скарамузза. Для качественного вычисления положений объектов в системе координат камеры необходимо получить параметры внутренней калибровки. В данной работе была использована модель камеры Скарамузза [6], как более качественная и устойчивая по сравнению с моделью из библиотеки OpenCV [20], также отмечается, что модель OpenCV становится несостоятельной при поле зрения более 110 градусов по большей стороне, а в используемых камерах поле зрения составляет 160 градусов по паспорту и порядка 140 градусов при эмпирической оценке.

Модель Скарамузза [6], подразумевает наличие двух плоскостей: плоскость изображения камеры (u', v'), совпадающая с плоскостью матрицы камеры (рис. 1,в), и плоскость сенсора (u'', v''), являющаяся гипотетической плоскостью, перпендикулярной оси камеры (рис. 1,б). На рис. 1,а изображены плоскости для катодиоптрической системы, при отсутствии зеркал меняется только знак u'' .

Если взять некоторую точку X на сцене, тогда взаимосвязь этой точки и точки на плоскости сенсора будет характеризоваться некоторым вектором p , направленным от точки обзора O к точке X . Таким образом проекция точки пересечения этого вектора с плоскостью изображения камеры будет отражать взаимосвязь точки на сцене и точки на плоскости сенсора (1).

$$\lambda \cdot p = \lambda \cdot g(u'') = \lambda \cdot g(A \cdot u' + t) = PX, \lambda > 0, \quad (1)$$

где P – матрица перспективной проекции, g – нелинейная функция.

Калибровка камеры подразумевает оценку матриц A и t , а также функции g так, чтобы вектор $g(A \cdot u' + t)$ удовлетворял уравнению, описанному выше.

Функция g имеет вид (2), при этом функция $f(u'', v'')$ является разложением в ряд Тейлора (3).

$$g(u'', v'') = (u'', v'', f(u'', v''))^T. \quad (2)$$

$$f(u'', v'') = a_0 + a_1 \cdot \rho'' + a_2 \cdot \rho''^2 + \dots + a_N \cdot \rho''^N, \quad (3)$$

где $\rho'' = \sqrt{u''^2 + v''^2}$, $a_i, i = 0, 1, 2, \dots, N$ – коэффициенты полинома, N – порядок полинома.

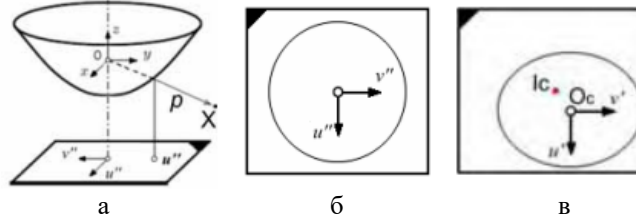


Рис. 1. Модель камеры Скарамuzzi: а – система координат в катадиоптрической системе, б – плоскость сенсора, в – плоскость изображения камеры

Алгоритмы вычисления положения объектов с использованием данных внутренней калибровки. Зная коэффициенты полинома и центр изображения, полученные после калибровки, можно найти некоторые углы в сферической системе координат, которые будут характеризовать луч из центра камеры к точке на сцене. Для начала осуществляется переход в координаты центра изображения (4).

$$\begin{aligned} u' &= u - x_c, \\ v' &= v - y_c, \end{aligned} \quad (4)$$

где x_c, y_c – координаты центра изображения,
 u, v – координаты пикселя в исходном изображении,
 u', v' – координаты относительно центра.

Далее, происходит обратное аффинное преобразование по формуле (5), и получение радиальной величины для заданных координат пикселя (6).

$$\begin{bmatrix} u'' \\ v'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & d \\ e & f \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\rho'' = \sqrt{u''^2 + v''^2}, \quad (6)$$

где $\begin{bmatrix} c & d \\ e & f \end{bmatrix}$ – матрица, полученная при калибровке.

Теперь появляется возможность получения координаты луча по оптической оси z , выраженной из полинома (7).

$$z_n = a_0 + a_1 \cdot \rho'' + a_2 \cdot \rho''^2 + \dots + a_N \cdot \rho''^N. \quad (7)$$

Вектор луча в таком случае имеет вид (8). Зная вектор, также можно получить углы в сферической системе координат θ – угол от оси, φ – азимут (9).

$$\bar{d} = \frac{[u'', v'', z_n]^T}{\sqrt{u''^2 + v''^2 + z_n^2}} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \theta &= \cos^{-1} d_z, \\ \varphi &= \tan^{-1} \frac{d_y}{d_x}. \end{aligned} \quad (9)$$

Однако углов или нормированного вектора недостаточно для получения координат изображения, так как они дают только направление к реальной точке, поэтому для координат в реальном мире необходимо знать хотя бы одно реальное значение расстояния на изображении.

Искомый объект находится в плоскости, параллельной плоскости XY , на расстоянии Z_0 , в связи с чем задачу определения расстояния до объекта можно свести к решению задачи пересечения луча с этой плоскостью.

Любая точка на луче выражается формулой (10) для расстояния Z_0 (11), Соответственно координаты точки пересечения луча с плоскостью выражаются формулой (12).

$$P(t) = t \cdot \vec{d}, \quad (10)$$

$$Z_0 = t \cdot d_z, \quad (11)$$

$$t = \frac{Z_0}{d_z},$$

$$P(t) = \frac{Z_0}{d_z} \cdot \vec{d}. \quad (12)$$

И теперь для поиска координат точки достаточно найти Z_0 , помимо этого можно найти координаты до любой точки объекта, так как Z_0 для всех точек постоянна. Найти расстояние Z_0 можно по координате по оси Y_c до точки, по высоте объекта или по ширине объекта.

Определение параметров объекта по известной высоте камеры. Это стандартная ситуация при оценке расстояния до объекта, для которого известно, что он расположен на полу. Тогда центральная нижняя точка рамки объекта используется как опорная при вычислении расстояния, а высота камеры над полом считается известной из конструктива робота. Примем расстояние H от камеры (начала координат) до искомой точки по оси Y_c известным. Искомая точка представлена на рис. 2. Тогда, подставив известную координату в уравнение точки, можно выразить Z_0 (13).

$$H = \frac{Z_0}{d_z} \cdot d_y, \quad (13)$$

$$Z_0 = \frac{d_z}{d_y} \cdot H.$$

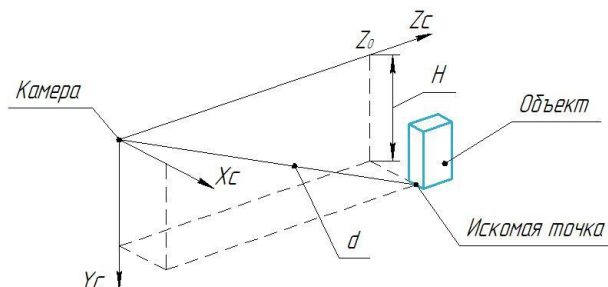


Рис. 2. Определение расстояния от камеры до точки с известной высотой

Используя рассчитанное расстояние до плоскости, перпендикулярной оптической оси камеры, и отклонение объекта от центральной точки несложно определить координаты объекта в проекции на поверхность перемещения (14).

$$Y = H, X = \frac{Z_0}{d_z} \cdot d_x. \quad (14)$$

Определение параметров объекта по известным метрическим размерам. Так как нейронная сеть позволяет в числе прочего оценить класс объекта, по известному классу для отдельных категорий объектов можно предварительно оценить их геометрические размеры, например, столы, стулья, мониторы, системные блоки ПК – имеют не сильно отличающиеся геометрические размеры, и в отсутствие иных опорных данных дистанция до объекта и его положение относительно камеры могут быть оценены с некоторой погрешностью по известным параметрам внутренней калибровки.

В случае известной высоты объекта в реальности в метрах и на изображении в пикселях, можно оценить расстояние до объекта с помощью разности координат верхней точки и нижней точки объекта, которые представлены на рис. 3.

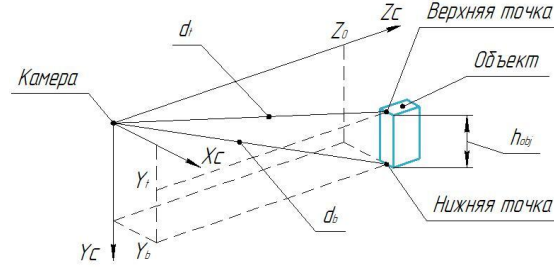


Рис. 3. Вычисление расстояния по известным верхней и нижней точке

Координата верхней точки принимается равной Y_t , нижней точки Y_b , тогда высота объекта h_{obj} вычисляется по формуле (15), на плоскости эти точки выражаются как (16).

$$h_{obj} = Y_b - Y_t, \quad (15)$$

$$Y_b = \frac{Z_0}{d_{zb}} \cdot d_{yb}, \quad (16)$$

$$Y_t = \frac{Z_0}{d_{zt}} \cdot d_{yt}.$$

Соответственно, высота объекта может быть выражена через формулы (17), и уже из данных соотношений можно выразить Z_0 (18).

$$h_{obj} = \frac{Z_0}{d_{zb}} \cdot d_{yb} - \frac{Z_0}{d_{zt}} \cdot d_{yt}, \quad (17)$$

$$h_{obj} = Z_0 \cdot \left(\frac{d_{yb}}{d_{zb}} - \frac{d_{yt}}{d_{zt}} \right),$$

$$Z_0 = \frac{h_{obj}}{\frac{d_{yb}}{d_{zb}} - \frac{d_{yt}}{d_{zt}}}. \quad (18)$$

Аналогичным образом можно получить эту формулу при известной ширине объекта w_{obj} . Разница будет заключаться только в используемых точках: вместо верхней и нижней точки для поиска координат будут использоваться координаты по оси X_c справа и слева: X_r и X_l , как показано на рис. 4.

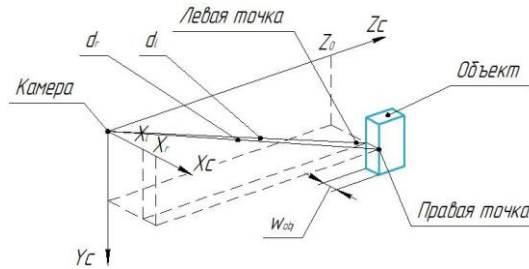


Рис. 4. Вычисление расстояния по известным правой и левой точкам

Итоговая формула вычисления расстояния по известной ширине и координатам точки будет иметь вид (19).

$$Z_0 = \frac{w_{obj}}{\frac{d_{xr}}{d_{zr}} - \frac{d_{xl}}{d_{zl}}}. \quad (19)$$

Описание экспериментального макета. Для экспериментального исследования предлагаемых алгоритмов методом 3D-печати был изготовлен макет системы кругового обзора для установки и последующего использования на мобильном роботе. Чертеж макета и фотография робота с установленным макетом представлены на рис. 5. Высота камер над поверхностью пола составляет 24 см. Положения камер относительно центральной точки макета: левая и правая смещены на 11 см, передняя выдвинута на 17 см, задняя на 8 см.

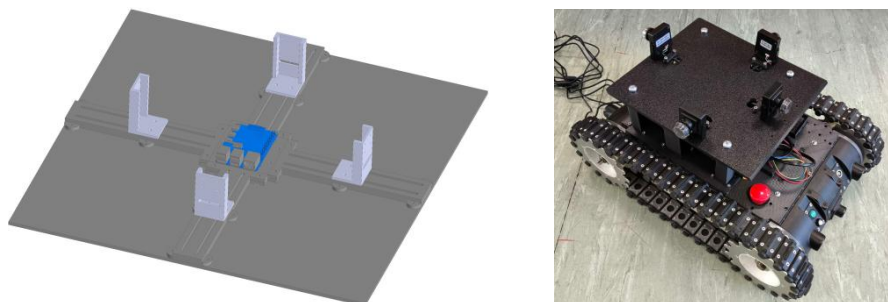


Рис. 5. Чертеж макета системы кругового обзора и фото робота с макетом

Экспериментальное исследование определения положения объектов. Для проверки полученных формул был проведён ряд экспериментов на 3 различных по ширине и высоте объектах. Для этого были сделаны кадры с известным расстоянием до объектов и его размерами, по которым математически было вычислено аналогичное расстояние программными средствами.

Размеры объектов для испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2

Размеры объектов для экспериментального исследования

№ объекта	Высота h_{obj} , см	Ширина w_{obj} , см
1	26,0	17,0
2	40,5	21,5
3	64,5	20,5

Для каждого объекта в каждом положении было сделано по 5 снимков с 4 широкоугольных камер одинаковой модели. Высота камер над полом 24,0 см. Для каждого снимка точки интереса (верхняя, нижняя, правая, левая, центральная) определялись рамкой, в которую помещался предмет (рис. 6).

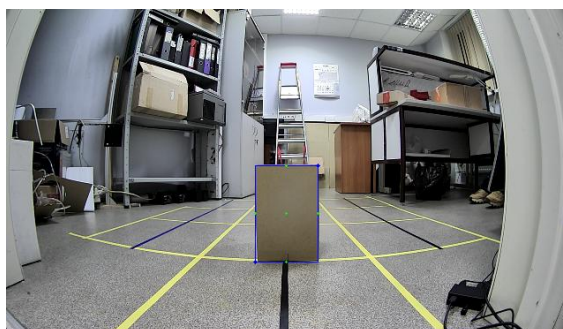


Рис. 6. Пример выделения объекта рамкой с точками интереса

Для оценки точности вычисления положения объекта в поле зрения камеры различными способами был выполнен ряд измерений. Дистанция от камеры до объекта варьировалась от 75 до 225 см, отклонение от оптической оси менялось от 0 до 1,5 м. В первом

эксперименте оценивалось качество определения дистанции до объекта (т.е. Z_0 , расстояние до плоскости, перпендикулярной оптической оси камеры, в которой расположена центральная нижняя точка выделенной рамки). Использовались уравнения, основанные на известной высоте камеры («... по H_c ») и известной ширине и высоте объекта («... по H_o » и «... по W_o »). Результаты экспериментов представлены в табл. 3.

Во втором эксперименте оценивалось качество определения размеров объекта с использованием построенных на основе формул и принципов калибровки геометрических соотношений. Оценивались ширина и высота объекта (« W_o ...» и « H_o ...») также по известной высоте камеры над опорной поверхностью, по заданной ширине объекта и заданной высоте объекта (дистанция и высота по ширине, дистанция и ширина по высоте). Результаты представлены в табл. 4.

Остановимся на метриках, представленных в таблицах. В левой части таблицы в столбцах расположены средние значения величин, полученные по всему набору возможных положений для заданных расстояния или габаритов объектов. Можно рассматривать как математическое ожидание измерения расстояния или размера в поле зрения камеры. В правой части представлено среднеквадратичное (стандартное) отклонение соответствующего измерения. Можно рассматривать его как меру разброса измерений относительно среднего, представленного в левой части.

Таблица 3

Результаты оценки дистанции до объекта разными способами (см.)

Дист.	Z_0 по H_c	Z_0 по W_o	Z_0 по H_o	$\sigma(Z_0/H_c)$	$\sigma(Z_0/W_o)$	$\sigma(Z_0/H_o)$
75	74,31	95,7	76,61	7,9	8,83	7,62
125	117,95	137,17	123,41	5,88	9,46	6,25
175	157,9	176,73	167,39	4,24	8,85	3,81
225	205,89	221,447	214,15	7,5	9,87	5,9

Таблица 4

Результаты оценки размеров объекта разными способами (см.)

Разм. объекта, см	W=17, H=26	W=22, H=40	W=21, H=65
H_o по H_c	25,11	39,06	60,87
W_o по H_c	14,89	18,3	18,07
H_o по W_o	29,17	46,58	69,53
W_o по H_o	15,44	19	19,17
$(H_o \text{ по } H_c)$	0,64	1,05	1,69
$(W_o \text{ по } H_c)$	1,77	2,02	1,49
$(H_o \text{ по } W_o)$	4,48	6,65	6,53
$(W_o \text{ по } H_o)$	1,89	2,22	1,63

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы. Наилучшим образом при прочих равных себя показало вычисление дистанции до нижней точки объекта по известной высоте камеры над поверхностью перемещения. Тем не менее, оценка по большему измерению объекта позволяет достигать схожих результатов. Следует отметить, что ошибки определения расстояния до объекта возникают во многом в связи с тем, что детектор стремится выделить объект целиком, захватывая некоторое количество фона, и это вносит искажения в определение положения середины нижней части объекта и вообще его габаритов на изображении.

Что касается оценки метрических размеров объекта, наилучшие результаты также были получены по известной высоте камеры и известной высоте объекта. Это отчасти связано с тем, что для оценки использовались объекты, вертикальное измерение которых существенно больше горизонтального. Отсюда, цена ошибки выделения в 1 пиксель для пересчета в градусы угла при измерении ширины оказывается существенно выше, вырастают и отклонения измерений, и разброс.

С точки зрения обеспечения безопасности движения даже такие ошибки могут быть признаны допустимыми, с учетом того, что они всегда в большую сторону, а быстродействие детектора составляет до 3 измерений в секунду и штатной скорости передвижения около 0,5 м/с (50 см/с).

Пример работы системы безопасности. Демонстрация возможного результата работы предлагаемой системы безопасности приведена на рис. 7. Слева представлены результаты обнаружения объектов, справа маркеры, обозначающие рассчитанные положения объектов на плоскости.

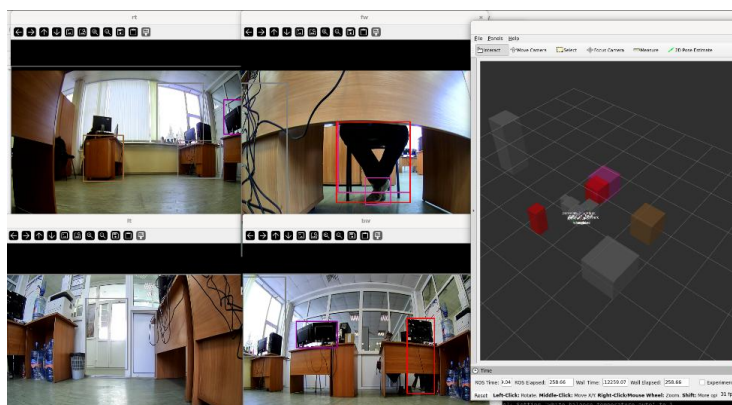


Рис. 7. Пример результатов работы системы безопасности

С учетом того, что используемая нейронная сеть обучена на классах набора данных OpenImages v7, и она способна распознавать 600 различных категорий объектов, для простоты отображения категории были объединены по цветам. В частности, из видимого на примере, красным обозначены люди (возможные подвижные объекты), сиреневым – обувь и одежда (часто бывают связаны с людьми), светло-коричневым – мебель, серым – различные объекты, которые могут быть расценены как препятствия.

Заключение. В работе представлена реализация системы обеспечения безопасности перемещения для мобильного робототехнического или иного транспортного средства, оснащенного системой кругового обзора на основе нескольких широкоугольных камер с суммарным полем зрения всех камер по горизонтали в 360 градусов и более. Так как в мобильной робототехнике есть существенные ограничения на энергопотребление, габариты и массу вычислителя, был выбран микрокомпьютер Orange Pi 5 Max с TPU на базе Rockchip RK3588. Его достаточно для предобработки изображений, расчета координат объектов и визуализации. Тензорные ядра обеспечивают успешный расчет нейронных сетей.

Были рассмотрены несколько вариантов предобработки изображений и вычисления нейронной сети. По результатам экспериментов выбран вариант с последовательным вызовом обзора каждого из изображений, т.к. сжатие показало существенное падение числа обнаруживаемых объектов, а прочие варианты полнокадровой обработки заняли больше времени. Получение данных о координатах объектов осуществляется с частотой в среднем 1,05 с.

Рассмотрен принцип построения калибровки Скарамузза для камер «рыбий глаз», после чего на основе известной калибровки и несложных геометрических соотношений предложено два варианта алгоритма оценки параметров объекта. В первом случае неизвестные параметры вычисляются по известной пиксельной высоте центра основания ограничивающей рамки и метрической высоте камеры над поверхностью, во втором случае – по пиксельным размерам рамки и геометрическим размерам объекта. По данным экспериментального исследования предложенных алгоритмов наибольшую точность по определению расстояния и размеров показали расчеты на основе высоты камеры над поверхностью (стандартное отклонение от 4,2 до 7,9 мм) и на основе высоты объекта (отклонение от 3,8 до 7,6 мм). Наилучшую точность в оценке расстояния также показали

алгоритмы на основе известной высоты камеры над поверхностью (стандартное отклонение от 0,64 до 2,02 мм) и по известной высоте объекта (от 1,63 до 2,22 мм). Оценка по ширине также может быть использована для обеспечения безопасности, если иная информация отсутствует.

Предложенный подход к обеспечению безопасности передвижения автономного транспортного средства на основе детектора объектов и камер системы кругового обзора признан работоспособным. В качестве дальнейшего развития работы предполагается провести исследование различных алгоритмов калибровки, внести в расчет информацию об ориентации транспортного средства по данным гироскопа, рассмотреть другие архитектуры нейронных сетей и обучить набор весов, адаптированный под решаемые задачи.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-00558-26-00 от 12.01.2026 «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. Половко С.А., Смирнова Е.Ю., Степанов Д.Н. Интеллектуальные системы технического зрения для безопасности и навигации // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 3. – С. 33-39.
2. Asvadi A., et al. 3D Lidar-based static and moving obstacle detection in driving environments: An approach based on voxels and multi-region ground planes // Robotics and Autonomous Systems. – 2016. – Vol. 83. – P. 299-311.
3. Sekine T. The image of automobile safety // International Association of Traffic and Safety Sciences, Interdisciplinary Wisdom of IATSS. – 2015. – P. 62.
4. Hamsini S., Kathires M. Automotive safety systems // Automotive Embedded Systems: Key Technologies, Innovations, and Applications. – Cham: Springer International Publishing, 2021. – P. 1-18.
5. Kazak A.N., et al. Service robotics development trends in the Russian Federation // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2021. – Vol. 2402, No. 1. – P. 070020.
6. Scaramuzza D., Martinelli A., Siegwart R. A toolbox for easily calibrating omni-directional cameras // 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – IEEE, 2006. – P. 5695-5701.
7. Park K.T., et al. Training YOLOv8 Object Detection Model with Synthetic Images // 2024 24th International Conference on Control, Automation and Systems (IC-CAS). – IEEE, 2024. – P. 524-528.
8. OpenImages V7 Description. – URL: https://storage.googleapis.com/openimages/web/factsfigures_v7.html (дата обращения: 06.02.2026).
9. Meng M., et al. Distortion-aware room layout estimation from a single fisheye image // 2021 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). – IEEE, 2021. – P. 441-449.
10. Meng M., et al. Distortion-aware room layout estimation from a single fisheye image // 2021 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). – IEEE, 2021. – P. 441-449.
11. Yan F., et al. Monocular catadioptric panoramic depth estimation via improved end-to-end neural network model // Frontiers in Neurorobotics. – 2023. – Vol. 17. – P. 1278986.
12. Simioni E., et al. Geometrical calibration for the panover: A stereo omnidirectional system for planetary rover // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2020. – Vol. 43. – P. 1151-1158.
13. Coates A.J., et al. The PanCam instrument for the ExoMars rover // Astrobiology. – 2017. – Vol. 17, No. 6-7. – P. 511-541.
14. Ullah H., et al. Automatic 360 mono-stereo panorama generation using a cost-effective multi-camera system // Sensors. – 2020. – Vol. 20, No. 11. – P. 3097.
15. Cui H., Zhao Z., Zhang F. Research on Panorama Generation from a Multi-Camera System by Object-Distance Estimation // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, No. 22. – P. 12309.
16. Прудников Н.В., Шлишевский В.Б. Панорамные оптико-электронные устройства кругового и секторного обзора // Вестник СГУГиТ. – 2016. – № 1 (33). – С. 148-161.
17. Kakani V., Kim H. Adaptive self-calibration of fisheye and wide-angle cameras // TENCON 2019-2019 IEEE Region 10 Conference (TENCON). – IEEE, 2019. – P. 976-981.
18. Douskos V., Kalisperakis I., Karras G. Automatic calibration of digital cameras using planar chessboard patterns // Proceedings of the 8th Conference on Optical. – 2007. – P. 9-12.
19. Jiang G., Quan L. Detection of concentric circles for camera calibration // Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05). Vol. 1. – IEEE, 2005. – P. 333-340.

20. Kannala J., Brandt S.S. A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses // *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. – 2006. – Vol. 28, No. 8. – P. 1335-1340.
21. Liu W., et al. Ssd: Single shot multibox detector // *European conference on computer vision*. – Cham: Springer International Publishing, 2016. – P. 21-37.
22. Duan K., et al. Centernet: Keypoint triplets for object detection // *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*. – 2019. – P. 6569-6578.
23. Alhasanat M.N., et al. Retinanet-based approach for object detection and distance estimation in an image // *International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP)*. – 2021. – Vol. 11, No. 1. – P. 1-9.
24. Tan M., Pang R., Le Q.V. Efficientdet: Scalable and efficient object detection // *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*. – 2020. – P. 10781-10790.
25. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection // *arXiv:1506.02640 [cs.CV]*. – 2015. – URL: <https://arxiv.org/abs/1506.02640> (дата обращения: 13.02.2026).
26. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks // *arXiv:1506.01497 [cs.CV]*. 2015. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1506.01497> (дата обращения: 06.02.2026).
27. He K., Gkioxari G., Dollár P., Girshick R. Mask R-CNN // *arXiv:1703.06870 [cs.CV]*. – 2017. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1703.06870> (дата обращения: 07.02.2026).
28. Sun P., et al. Sparse r-cnn: End-to-end object detection with learnable proposals // *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*. – 2021. – P. 14454-14463.
29. Shridhar A., Tomson P., Innes M. Interoperating deep learning models with onnx. jl // *Proceedings of the JuliaCon Conferences*. – 2020. – Vol. 1, No. 1. – P. 59.
30. Jegham N., et al. Yolo evolution: A comprehensive benchmark and architectural review of yolov12, yolov11, and their previous versions // *arXiv preprint arXiv:2411.00201*. – 2024.
31. Ultralytics | Revolutionizing the World of Vision AI. – URL: <https://www.ultralytics.com/> (дата обращения 02.02.2026).
32. GitHub – Pelochus/ezrknn-toolkit2. Making Rockchip's RKNN-Toolkit-2 easier for SBCs like Orange Pi 5 or Radxa Rock 5. – URL: <https://github.com/Pelochus/ezrknn-toolkit2> (дата обращения 02.02.2026).

REFERENCES

1. Polovko S.A., Smirnova E.Yu., Stepanov D.N. Intellektual'nye sistemy tekhnicheskogo zreniya dlya bezopasnosti i navigatsii [Intelligent machine vision systems for safety and navigation], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2009, No. 3, pp. 33-39.
2. Asvadi A., et al. 3D Lidar-based static and moving obstacle detection in driving environments: An approach based on voxels and multi-region ground planes, *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, Vol. 83, pp. 299-311.
3. Sekine T. The image of automobile safety, *International Association of Traffic and Safety Sciences, Interdisciplinary Wisdom of IATSS*, 2015, pp. 62.
4. Hamsini S., Kathiresh M. Automotive safety systems, *Automotive Embedded Systems: Key Technologies, Innovations, and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 1-18.
5. Kazak A.N., et al. Service robotics development trends in the Russian Federation, *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, 2021, Vol. 2402, No. 1, pp. 070020.
6. Scaramuzza D., Martinelli A., Siegwart R. A toolbox for easily calibrating omni-directional cameras, 2006 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2006, pp. 5695-5701.
7. Park K.T., et al. Training YOLOv8 Object Detection Model with Synthetic Images, 2024 *24th International Conference on Control, Automation and Systems (IC-CAS)*. IEEE, 2024, pp. 524-528.
8. OpenImages V7 Description. Available at: https://storage.googleapis.com/openimages/web/factsfigures_v7.html (accessed 6 February 2011).
9. Meng M., et al. Distortion-aware room layout estimation from a single fisheye image, 2021 *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. IEEE, 2021, pp. 441-449.
10. Meng M., et al. Distortion-aware room layout estimation from a single fisheye image, 2021 *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. IEEE, 2021, pp. 441-449.
11. Yan F., et al. Monocular catadioptric panoramic depth estimation via improved end-to-end neural network model, *Frontiers in Neurorobotics*, 2023, Vol. 17, pp. 1278986.
12. Simioni E., et al. Geometrical calibration for the panover: A stereo omnidirectional system for planetary rover, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, Vol. 43, pp. 1151-1158.

13. Coates A.J., et al. The PanCam instrument for the ExoMars rover, *Astrobiology*, 2017, Vol. 17, No. 6-7, pp. 511-541.
14. Ullah H., et al. Automatic 360 mono-stereo panorama generation using a cost-effective multi-camera system, *Sensors*, 2020, Vol. 20, No. 11, pp. 3097.
15. Cui H., Zhao Z., Zhang F. Research on Panorama Generation from a Multi-Camera System by Object-Distance Estimation, *Applied Sciences*, 2023, Vol. 13, No. 22, pp. 12309.
16. Prudnikov N.V., Shlishevskiy V.B. Panorамные оптико-электронные устройства кругового и секторного обзора [Panoramic optoelectronic devices for circular and sectorial surveillance], *Vestnik SGUGiT* [Bulletin of SSUGT], 2016, No. 1 (33), pp. 148-161.
17. Kakani V., Kim H. Adaptive self-calibration of fisheye and wide-angle cameras, *TENCON 2019-2019 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*. IEEE, 2019, pp. 976-981.
18. Douskos V., Kalisperakis I., Karras G. Automatic calibration of digital cameras using planar chess-board patterns, *Proceedings of the 8th Conference on Op-tical*, 2007, pp. 9-12.
19. Jiang G., Quan L. Detection of concentric circles for camera calibration, *Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05)*. Vol. 1. IEEE, 2005, pp. 333-340.
20. Kannala J., Brandt S.S. A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2006, Vol. 28, No. 8, pp. 1335-1340.
21. Liu W., et al. Ssd: Single shot multibox detector, *European conference on computer vision*. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 21-37.
22. Duan K., et al. Centernet: Keypoint triplets for object detection, *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*, 2019, pp. 6569-6578.
23. Alhasanat M.N., et al. Retinanet-based approach for object detection and dis-tance estimation in an image, *International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP)*, 2021, Vol. 11, No. 1, pp. 1-9.
24. Tan M., Pang R., Le Q.V. Efficientdet: Scalable and efficient object de-tection, *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pat-tern recognition*, 2020, pp. 10781-10790.
25. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Ob-ject Detection, *arXiv:1506.02640 [cs.CV]*, 2015. Available at: <https://arxiv.org/abs/1506.02640> (accessed 13 February).
26. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks, *arXiv:1506.01497 [cs.CV]*, 2015. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1506.01497> (accessed 06 February 2026).
27. He K., Gkioxari G., Dollár P., Girshick R. Mask R-CNN // *arXiv:1703.06870 [cs.CV]*, 2017. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1703.06870> (accessed 7 February).
28. Sun P., et al. Sparse r-cnn: End-to-end object detection with learnable proposals, *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2021, pp. 14454-14463.
29. Shridhar A., Tomson P., Innes M. Interoperating deep learning models with onnx. JI, *Proceedings of the JuliaCon Conferences*, 2020, Vol. 1, No. 1, pp. 59.
30. Jegham N., et al. Yolo evolution: A comprehensive benchmark and archi-tectural review of yolov12, yolo11, and their previous versions, *arXiv preprint arXiv:2411.00201*, 2024.
31. Ultralytics | Revolutionizing the World of Vision AI. Available at: <https://www.ultralytics.com/> (дата обращения 02.02.2026).
32. GitHub – Pelochus/ezrknn-toolkit2. Making Rockchip’s RKNN-Toolkit-2 easier for SBCs like Orange Pi 5 or Radxa Rock 5. Available at: <https://github.com/Pelochus/ezrknn-toolkit2> (accessed 2 February).

Фомин Иван Сергеевич – Государственный научный центр РФ – Федеральное государственное автономное научное учреждение «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.

Базельцев Артемий Андреевич – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»; e-mail: bazeltsev.aa@edu.spbstu.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78007071899; студент.

Fomin Ivan Sergeevich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: i.fomin@rtc.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +78125523351; researcher.

Baseltsev Artemii Andreevich – Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University; e-mail: bazeltsev.aa@edu.spbstu.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78007071899; undergraduate student.

К.И. Морев**СИСТЕМА СОПОСТАВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ИНТУИЦИОНИСТСКИХ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ**

Представлена полностью обучаемая система для решения задачи сопоставления двух изображений. Все основные элементы системы являются обучаемыми, т.е. их финальный вид соответствует целевому набору данных по которому проводилось обучение. Факт обучаемости системы, методы, используемые при обучении, и архитектура системы позволяют использовать систему для решения большого числа разнообразных задач компьютерного зрения. Система состоит из сверточной нейронной сети, служащей одновременно для выделения особых точек и их дескрипторов, а также обучаемого модуля сопоставления выделенных особых точек на основе их описания и взаимного расположения в наблюдаемой сцене. Используемая сверточная нейронная сеть обрабатывает полноразмерные изображения и вычисляет как местоположение точек интереса с пиксельной точностью, так и связанные с ними дескрипторы за один полный цикл вычислений. Сопоставление особых точек – отдельный шаг и выполняется после выполнения полного цикла вычислений нейронной сети, но на основе результатов этих вычислений. В процессе обучения модели вычисления положений особых точек и их дескрипторов используется метод формирования обучающей выборки, называемый гомографическая адаптация – подход, способствующий повышению повторяемости и точности обнаружения особых точек. Процесс обучения модели выделения особых точек заключается в получении новых весов в процессе дообучения базового детектора, представляющего инициализирующие веса модели. Финальная модель выделения особых точек, обученная на универсальном наборе изображений MS-COCO с использованием гомографической адаптации, многократно превосходит исходный базовый детектор по параметрам количества, надежности и повторяемости особых точек, а также превосходит любой другой традиционный детектор углов основанный на классических подходах.

Машинное обучение; сверточная нейронная сеть; сопоставление изображений; особые точки изображения; сопоставление особых точек; интуиционистская нечеткая логика.

K.I. Morev**IMAGE MATCHING SYSTEM WITH USING INTUITIONISTIC FUZZY SETS**

This paper presents a fully learnable system for solving the problem of matching two images. All the main elements of the system are trainable, i.e. their final form corresponds to the target dataset on which the training was carried out. The fact that the system is trainable, the methods used in training and the architecture of the system allow using the system to solve a large number of various computer vision problems. The system consists of a convolutional neural network that serves both to extract key points and their descriptors, as well as a trainable matcher of the extracted key points based on their description and mutual arrangement in the observed scene. The used convolutional neural network processes full-size images and calculates both the location of interest points with pixel accuracy and the descriptors associated with them in a single forward pass. Matching key points is a separate step and is performed after the forward pass of the neural network. In the process of training the model for calculating the positions of key points and their descriptors, a method for forming a training sample is used, called homographic adaptation - an approach that helps to increase the repeatability and accuracy of detecting key points. The process of training the feature point detection model consists of obtaining new weights in the process of additional training of the base detector, which represents the initialization weights of the model. The final feature point detection model, trained on the universal MS-COCO image set using homographic adaptation, repeatedly outperforms the original base detector in terms of the number, reliability and repeatability of feature points, and also outperforms any other traditional corner detector based on classical approaches.

Machine learning; convolutional neural network; image matching; image local features; feature point matching; intuitionistic fuzzy logic.

Введение. Первым шагом в задачах компьютерного зрения с геометрическим контекстом, таких как одновременная локализация и картографирование [1], восстановление структуры из движения [2], калибровка камеры или сопоставление изображений является извлечение точек интереса из изображений [3]. Точка интереса – это двумерная область на изображении, хорошо локализуемая и не изменяющая своих характеристик при различных условиях освещения и ракурсах [4]. Большинство алгоритмов раздела компью-

терного зрения, известного как «геометрия множества ракурсов», основаны на предположении, что точки интереса могут быть надежно извлечены и сопоставлены на изображениях. Однако в составе реальных систем компьютерного зрения входными данными для алгоритмов являются необработанные изображения извлечение из которых идеализированных точек интереса и их описаний на самом деле является сложной задачей. Многими исследователями было показано, что сверточные нейронные сети превосходят ручную разработанные методы практически во всех задачах, использующих изображения в качестве входных данных. В частности, полностью сверточные нейронные сети, которые выделяют двумерные ключевые точки, хорошо изучены для различных таких задач как оценка позы человека, обнаружение объектов и построение карты помещения [5]. Обучение таких моделей основано на обучении с учителем и большом наборе истинных данных о связи между элементами сцены на различных изображениях, а также о взаимосвязях внутренних элементов одного изображения, другими словами, на размеченных данных.

Используемая в данной работе нейронная сеть выделения особых точек SuperPoint [6] предлагает методики обучения с применением техник самообучения. Вместо использования вручную размеченных данных и строгого контроля, в процессе обучения создается большой набор данных псевдоистинных точек интереса на реальных изображениях, сформированных некоторым базовым детектором точек интереса, и не требующих масштабной человеческой работы по разметке.

Для получения базового детектора и генерации псевдоистинных точек интереса, сначала обучается полностью сверточная нейронная сеть на миллионах примеров из созданного синтетического набора данных. Синтетический набор данных состоит из простых геометрических фигур с однозначно известным расположением точек интереса. Полученный обученный детектор будет являться базовым для инициализации весов итогового обучаемого детектора. Очевидно, что по сравнению с классическими детекторами точек интереса на разнообразном наборе реальных текстур и узоров изображений, базовый детектор пропускает многие потенциально надежные точки интереса. Для устранения этого недостатка, используется многомасштабный метод синтезированных преобразований – гомографическая адаптация. Гомографическая адаптация предназначена для самоконтролируемого обучения детекторов точек интереса. Адаптация заключается в многократной деформации входного изображения, для имитации наблюдения сцены с множества различных ракурсов и при различных масштабах.

После обнаружения надежных и повторяемых точек интереса, для решения более высокоуровневых семантических задач, например, сопоставления изображений, требуется назначение каждой точке вектора фиксированного размера в качестве дескриптора. Используемая модель SuperPoint устроена таким образом, что все выделенные карты признаков идут одновременно и в модуль выделения особых точек, и в модуль вычисления их дескрипторов. Далее вычисленные особые точки и их описания подаются на вход модулю сопоставления, который на основе нечетких функций принадлежности решает задачу назначения соответствий между точками. Результирующая система показана на рис. 1.

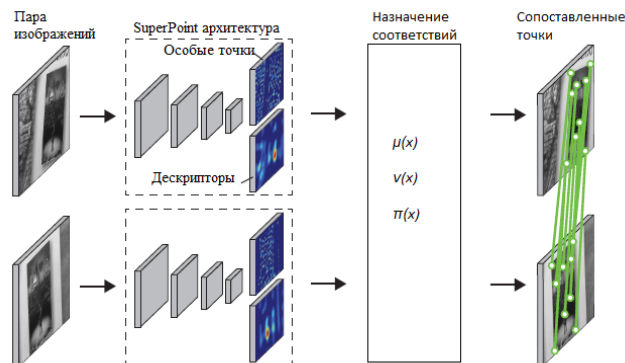


Рис. 1. Общая схема обучаемой системы сопоставления изображений

Схожие подходы. Традиционные детекторы точек интереса были тщательно изучены ранее [7, 8]. Детектор углов FAST был первой попыткой решения задачи выделения особых точек с помощью машинного обучения, а масштабно-инвариантное преобразование признаков, или SIFT, до сих пор, является наиболее известным дескриптором локальных признаков в компьютерном зрении, основанным на традиционных подходах. Используемая архитектура SuperPoint вдохновлена достижениями в применении глубокого обучения в обнаружении точек интереса и обучении дескрипторов. В способности выявлять и сопоставлять внутренние паттерны в изображениях, SuperPoint подобен UCN [9] и в некоторой степени DeepDesc [10]. Однако оба упомянутых алгоритма не выполняют обнаружения точек интереса, а только вычисление их дескрипторов.

Другая альтернатива LIFT – сверточная сеть, реализующая близкую к традиционной цепочке «обнаружить, затем описать» последовательность на основе патчей. Конвейер LIFT включает обнаружение точек интереса, оценку ориентации и вычисление дескрипторов, но дополнительно требует контроля со стороны и разметки при формировании данных для обучения.

Примером обучения без учителя выступил Quad-Networks. Однако эта архитектура основана на патчах (входные данные представляют собой небольшие фрагменты изображения) и является относительно мелкой двухслойной сетью. Система обнаружения точек интереса TILDE использовала принцип, аналогичный принципу гомографической адаптации. Однако этот подход не использует мощь больших сверточных нейронных сетей для выделения признаков.

Архитектура SuperPoint. SuperPoint – архитектура полностью сверточной нейронной сети, которая работает с полноразмерным изображением и выполняет обнаружение точек интереса, а также вычисление для обнаруженных точек дескрипторов, за один прямой проход (рис. 2).

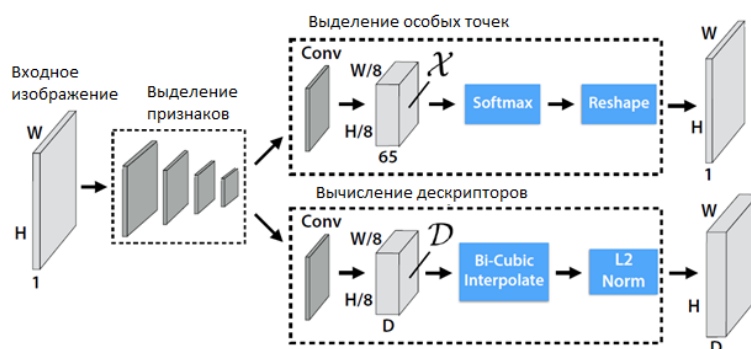


Рис. 2. Схема архитектуры SuperPoint.

Модель SuperPoint имеет один общий блок выделения признаков или «кодер». На рис. 2 «кодер» обведен мелким пунктиром и подписан «Выделение признаков». «Кодер» занимается обработкой входного изображения с целью уменьшения его размерности и выделения признаков. После «кодера» архитектура разделяется на две «головы». «Голова» – отдельная часть архитектуры сети, отвечающая за решение своей конкретной задачи, иначе «голову» можно назвать «декодер». На рис. 2 пунктиром выделены две «головы» архитектуры, вычисляемые после блока выделения признаков. «Голова», отвечающая за выделение особых точек на изображении, обведена жирным пунктиром и подписана «Выделение особых точек». «Голова», отвечающая за формирование описаний для выделенных особых точек, аналогично обведена жирным пунктиром и подписана «Вычисление дескрипторов». Схема на рис. 2 наглядно демонстрирует наличие общего «кодера» для обеих «голов», что отличает SuperPoint от традиционных систем, которые сначала обнаруживают точки интереса, а затем вычисляют дескрипторы и не могут совместно использовать один общий набор признаков [11].

Общий «кодер». SuperPoint использует кодер в стиле VGG [12] для уменьшения размерности изображения. Кодер составляют сверточные слои, блок понижения пространственной размерности и нелинейные функции активации. Выходное изображение «кодера» состоит из пикселей, полученных путем серии сверток и выбора максимума результата свертки в области 2×2 пикселя. Выбор максимума в области 2×2 пикселя, или «макс-пулинг» ядром размера 2×2 , понижает размерность изображения в два раза, т.к. из каждой ячейки 2×2 исходного изображения выбирается только 1 пиксель. Три последовательных (по разу в каждом новом представлении внутри «кодера») операции «макс-пулинг» уменьшают размерность итогового изображения в 8 раз по каждой из осей. Кодер преобразует входное изображение I в промежуточный тензор B с меньшей пространственной размерностью, но большим количеством каналов так, что

$$I \in R^{H \times W}$$

и

$$B \in R^{H_c \times W_c \times F}.$$

Для обнаружения особых точек решается задача назначения каждому пикселю выходных данных сети вероятности «принадлежности» к классу особая точка. Эта вероятность далее восстанавливается для соответствующего пикселя на входных данных. Стандартная конструкция сети для попиксельной классификации включает в себя пару «кодер-декодер», где пространственное разрешение уменьшается с помощью объединения или пошаговой свертки, а затем повышается до полного разрешения с помощью операций повышения размерности, например, как это делается в SegNet. Однако, слои, повышающие размерность, как правило, требуют большого объема вычислений и могут вносить нежелательные артефакты [13], поэтому после получения признаков для выделения особых точек используется специальный декодер без масштабирования, чтобы сократить объем вычислений модели.

«Голова» детектора из входного набора признаков вычисляет представление χ

$$\chi \in R^{H_c \times W_c \times 65}. \quad (1)$$

И формирует тензор

$$R^{H \times W}, \quad (2)$$

где 65 каналов соответствуют локальным, неперекрывающимся областям сетки 8×8 пикселей и дополнительный канал со слабым откликом «без точек интереса». После применения функции «softmax» для каждого канала и удаления канала со слабым откликом «без точек интереса» выполняется изменение формы тензора таким образом, что представление из выражения (1) преобразуется в (2):

$$R^{H_c \times W_c \times 65} \rightarrow R^{H \times W}.$$

«Голова» для дескрипторов вычисляет представление D

$$D \in R^{H_c \times W_c \times D},$$

и формирует тензор размером

$$R^{H \times W \times D}.$$

Для вывода плотной карты L2-нормализованных дескрипторов фиксированной длины используется модель, похожая на UCN, чтобы вывести разреженную сетку дескрипторов (например, один на каждые 8 пикселей). Формирование дескрипторов выполняется для разреженной сетки, а не плотной, для уменьшения требований памяти при обучении и сокращения времени вычисления дескрипторов во время выполнения [14]. Далее в декодере выполняется бикубическая интерполяция разреженных дескрипторов для вычисления плотной сетки и затем L2-нормализует полученные дескрипторы для формирования векторов единичной длины.

Гомографическая адаптация. SuperPoint при обучении требует начальные веса базового детектора точек интереса и большой набор неразмеченных изображений (например, MS-COCO). Работая в парадигме обучения без учителя, сначала генерируется набор псевдоистинных точек интереса для каждого изображения в имеющемся наборе, а далее

используется традиционный механизм обучения. В основе описываемого метода лежит процесс, который применяет случайные матрицы гомографии для преобразования копий входного изображения с последующим выделением особых точек на измененных копиях и репроекции их на оригинальное изображение. Объединение результатов репроецированных особых точек – процесс, который называется гомографической адаптацией (рис. 3).

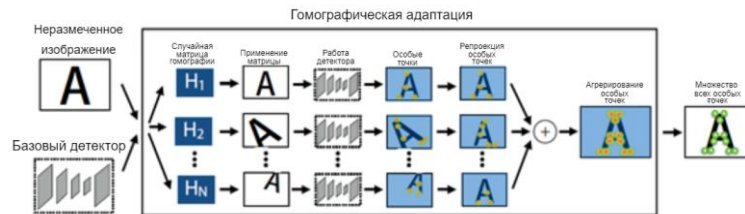


Рис. 3. Гомографическая адаптация

Используются матрицы гомографии, потому что они дают точные преобразования исходного изображения в другое изображение в случае имитации движения камеры с вращением вокруг оптической оси или для сцен с большими расстояниями до объектов и плоских сцен. В дополнение, поскольку проекция мира в кадр – плоская, то матрица гомографии является хорошей моделью, описывающей изменения, возникающие при наблюдении одной точки объемного мира с разных ракурсов.

Пусть преобразование $f_\theta(\cdot)$ представляет собой функцию выделения идеальных точек интереса, которую мы хотим аппроксимировать, I – входное изображение, x – полученные точки интереса, а H – случайная матрица гомографии. Таким образом

$$x = f_\theta(I).$$

Идеальный оператор точки интереса должен быть ковариантным относительно матрицы гомографии. Функция $f_\theta(\cdot)$ ковариантна H , если выход преобразуется вместе с входом. Другими словами, ковариантный детектор будет удовлетворять для любой H :

$$Hx = f_\theta(H(I)), \quad (3)$$

перемещая операторы гомографии вправо, получаем:

$$x = H^{-1}f_\theta(H(I)). \quad (4)$$

На основании выражения (4) можно сформировать следующий вывод: для произвольного детектора особых точек $f_\theta(\cdot)$, и двух изображений I и $I' = H(I)$, связанных матрицей гомографии H , справедливо что выделенные на I особые точки $x = f_\theta(I)$ и выделенные на I' особые точки $x' = f_\theta(I')$ будут идентичны и отличаться только положением (в соответствии с преобразованием между изображениями H). В этом и заключается свойство ковариантности детектора $f_\theta(\cdot)$ относительно матрицы H .

Однако на практике детектор не будет идеально ковариантным – разные матрицы гомографии в выражении (3) выше приведут к разным особым точкам x . Основная идея гомографической адаптации заключается в проведении суммирования всех особых точек по достаточной большой выборке случайных H (см. рисунок 3). Результирующее агрегирование по выборкам, таким образом, приводит к новому и улучшенному детектору $F(\cdot)$:

$$F(I, f_\theta) = \frac{1}{N_h} \sum_{i=1}^{N_h} H^{-1}f_\theta(H(I)).$$

Сопоставление особых точек. После выполнения процедуры выделения и описания особых точек на двух изображениях следует процедура их сопоставления. Сопоставление особых точек заключается в поиске для каждой выделенной особой точки (далее – ОТ) ее же отображения на другом изображении сцены [15, 16]. В общем случае, точки на изображениях сцены связаны некоторым линейным преобразованием M , взаимно трансформирующим один набор точек в другой [17]. В рамках представленной работы исследуется группа линейных геометрических преобразований плоскости, ограниченная только смещением, поворотом, масштабом.

При решении задачи сопоставления найденных ОТ используется обучаемый модуль сопоставления, задача которого – выделить из набора всех возможных соответствий между точками только истинные. Другими словами – из множества всех соответствий выделить подмножество истинных соответствий. При разделении подмножеств, в качестве признаков используются интуиционистские степени принадлежности и частично теория интуиционистских нечетких множеств (далее - ИНМ). Процесс формирования значений принадлежности, непринадлежности и неопределенности раскрывается ниже.

Для сопоставления, пользуясь методом полного перебора, сравниваются дескрипторы (описания) окрестностей всех точек [18]. Результатом сравнения дескрипторов является расстояние между описаниями ОТ [19]. Это расстояние формируется как Эвклидово расстояние в признаковом пространстве между двумя векторами дескрипторов. Так получаем количественную оценку разницы окрестностей для всех ОТ двух изображений. Полученное множество пар соответствий фильтруется по относительному порогу:

$$f(dif) = 1 - \frac{dif}{desc_vec_len},$$

$$\begin{cases} match = true, \text{ когда } f(dif) \geq thr \\ match = false, \text{ когда } f(dif) < thr \end{cases}$$

где dif – вычисленное расстояние, $desc_vec_len$ – длина вектора дескриптора, thr – выбираемый в процессе работы (обучение) порог в пределах $[0; 1]$, а $match$ – истинность проверяемого соответствия. Таким образом из всего множества соответствий выбираются пары, точки в которых схожи по дескрипторам (относительно обучаемого порогового значения thr).

Значение функции непринадлежности $v(x)$ пары ко множеству истинных соответствий определяется разностью описаний точек. Чем больше величина этой метрики, тем выше степень несоответствия, и эта величина интерпретируется как степень ложности соответствия. Графическое представление функции непринадлежности показано на рис. 4, при этом максимальное значение разницы между векторными описаниями равняется 2, что соответствует максимально возможному расстоянию между векторами нормированной длины.

$$v(x) = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^n (a_k - b_k)^2}}{2},$$

где x – оцениваемое соответствие, a и b – дескрипторы ОТ из соответствия x .

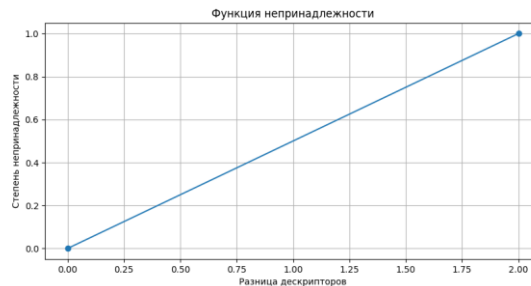


Рис. 4. Функция непринадлежности, $v(x)$

Далее, для прошедших порог соответствий, вычисляется структура сопоставленных точек: случайно взятое соответствие назначается опорным и от точки опорного соответствия на первом (из двух сопоставляемых изображений) назначается дистанция (в пикселях) и угол поворота относительно всех остальных сопоставленных точек на первом изображении. Аналогично и для второго изображения.

Дистанция между точками определяется как Эвклидово расстояние [20]:

$$D_{ij} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2},$$

где D_{ij} обозначает дистанцию, i и j – индексы разных точек, а X и Y представляют собой координаты центров особых точек в системе координат изображения. В системе координат изображения дистанция измеряется в пикселях. Угол поворота между двумя точками вычисляется как угол между вектором, который соединяет опорную точку с оцениваемой, и положительным направлением оси Ox (направление осей Ox , Oy изображено на рисунке 5 векторами белого цвета). Таким образом, в результате построения структуры особых точек, для каждой прошедшей фильтрацию особой точки имеется дистанция и угол поворота относительно опорной точки в изображении.

На рис. 5 отображён процесс построения структуры. Соответствия, прошедшие фильтрацию по заданному порогу сходства дескрипторов, выделены жёлтыми линиями. Синим цветом изображены линии построения структуры сопоставленных ОТ. Бирюзовыми точками обозначены центры сопоставленных особых точек. Построение структуры в каждом изображении начинается от опорной точки, отмеченной буквой «О» красного цвета и крестом, и заключается в определении дистанций и углов поворота до всех остальных сопоставленных точек, прошедших фильтрацию по порогу.

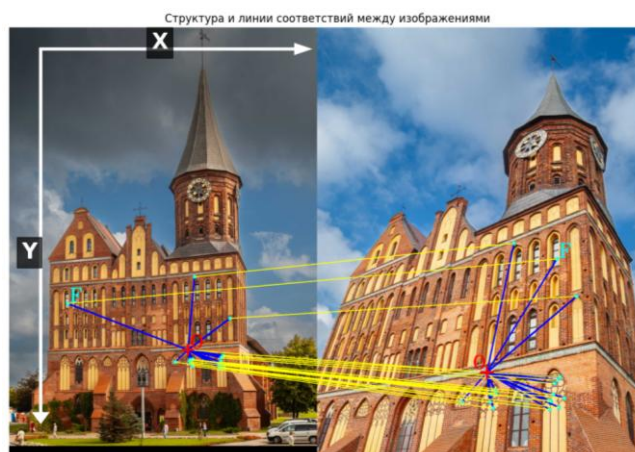


Рис. 5. Пример определения структуры ОТ на изображениях

Стоит отметить, что на рис. 5 есть одно ложное соответствие. Точки, соединяемые этим соответствием обозначены буквой «F» бирюзового цвета. В данном случае ложное соответствие соединяет похожие по признаковому описанию особые точки (на первом и втором изображениях особая точка «F» – это кусок оконной рамы), однако соединенные особые точки изображений отображают различные точки реального 3-Д пространства.

Для каждой пары соответствующих точек, которые прошли фильтрацию, известны дистанция и угол поворота относительно опорной точки в изображении. При предположении, что истинное соответствие связывает одну и ту же точку сцены на двух различных изображениях, можно считать, что искомое преобразование M действует по универсальному правилу. В результате все истинные соответствия формируют кластер точек, которые перемещаются в пространстве сходным образом. Это означает, что структура точек сохраняется, а их дистанции и углы поворота изменяются пропорционально. В идеальном случае все истинные соответствия образуют кластер, для которого выполняется следующее условие:

$$\begin{cases} \frac{M_1 dist_a}{M_1 dist_b} = \frac{M_2 dist_a}{M_2 dist_b} = \dots = \frac{M_n dist_a}{M_n dist_b}, \\ M_1 angle_a - M_1 angle_b = \dots = M_n angle_a - M_n angle_b, \end{cases}$$

где $M_i dist_a$ и $M_i dist_b$ – значения дистанций ОТ для сопоставляемых изображений соответственно из i -го соответствия, а $M_i angle_a$ и $M_i angle_b$ – значения углов поворота ОТ.

Анализируя изменения углов и дистанций для истинных соответствий, можно определить угол поворота сцены и масштаб её изображения [22]. Изменение масштаба сцены вычисляется как отношение дистанций особых точек первого изображения к дистанциям особых точек второго изображения, тогда как поворот определяется как разница углов поворота особых точек точки первого и второго изображений.

Тем не менее, на практике данные часто бывают сильно зашумлены. Шум возникает из-за особенностей работы детекторов ОТ, ошибок субпиксельного позиционирования центров ОТ и неточностей при сравнении соседних областей [23, 24]. При предположении, что шум подчиняется нормальному распределению, за истинные соответствия принимаются те, у которых изменения дистанции и угла поворота укладываются в установленные границы:

$$\begin{cases} \delta_{dist} \pm \sigma_{dist} \\ \delta_{angle} \pm \sigma_{angle} \end{cases}$$

где δ – среднее значение, а σ – среднеквадратичное отклонение (далее – СКО) для распределения изменений дистанций (*dist*) и угла поворота (*angle*).

То есть, после вычисления изменений дистанции и угла поворота для всех проверяемых соответствий, определяется среднее значение δ и стандартное отклонение σ для всего распределения. Если изменение дистанции или угла поворота для конкретного соответствия отклоняется от среднего более чем на установленный порог, такое соответствие признается ложным. В случае, когда относительное отклонение меньше порогового значения, оно рассматривается как степень принадлежности к истинным соответствиям. На основе этого формируется функция принадлежности или степень истинности, которая имеет следующий вид:

$$\mu(x) = \max\left(1 - \frac{|dist - \delta_{dist}|}{\sigma_{dist}}, 1 - \frac{|angle - \delta_{angle}|}{\sigma_{angle}}\right),$$

где *dist* – изменение дистанции ОТ, *angle* – изменение ее угла поворота, δ_{scale} и δ_{rotate} – средние значения распределения изменений дистанции и угла поворота соответственно, а σ_{dist} и σ_{angle} – соответствующие СКО. На рис. 6 отображена функция принадлежности $\mu(x)$.

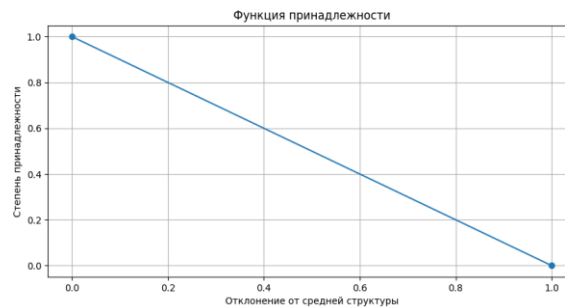


Рис. 6. Функция принадлежности, $\mu(x)$.

Таким образом, для каждого соответствия вычисляется степень его истинности и ложности. Однако согласно свойствам интуиционистских нечетких множеств, сумма значений функций принадлежности и непринадлежности не должна превышать единицу. При использовании приведённых выше функций оценки соответствия и несоответствия могут возникать ситуации, когда это условие нарушается (рис. 7, левая часть).

Для решения этой проблемы использовался подход, предлагаемый Атанасовым К., описанный в [25]. Подход заключается в нормализации имеющихся значений функций принадлежности и непринадлежности. В результате нормализации сумма значений функций не превышает 1. Графическое представление нормализации изображено на рис. 7 и описывается переходом от единичного квадрата, изображенного на рис. 7 слева, к классической треугольной интерпретации интуиционистского нечеткого множества (см. рис. 7 справа).

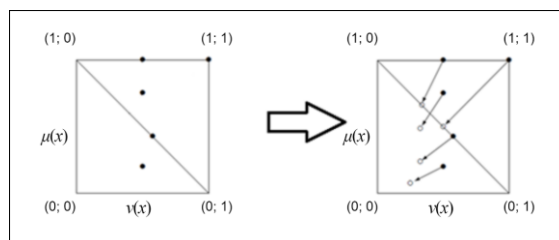


Рис. 7. Интерпретация ИИМ при заданных функциях $\mu(x)$ и $\nu(x)$. Слева некорректная форма ИИМ, в которой сумма $\mu(x)$ и $\nu(x)$ может превышать 1. Справа преобразованное в корректную форму ИИМ

Нормализация осуществляется при помощи непрерывного биективного преобразования:

$$F(\nu, \mu) = \begin{cases} < 0, 0 >, \text{ при } \nu = \mu = 0 \\ < \frac{\mu^2}{\mu + \nu}, \frac{\mu\nu}{\mu + \nu} >, \text{ при } \nu, \mu \in [0, 1] \text{ и } \nu \geq \mu \text{ и } \nu + \mu \neq 0 \\ < \frac{\mu\nu}{\mu + \nu}, \frac{\mu^2}{\mu + \nu} >, \text{ при } \nu, \mu \in [0, 1] \text{ и } \nu \leq \mu \text{ и } \nu + \mu \neq 0 \end{cases}$$

где μ и ν – заданные значения функций принадлежности и непринадлежности соответственно. Заданные значения преобразуются для представления в корректной форме ИИМ.

Далее, применяя приведенное выше преобразование к полученным значениям степени принадлежности и непринадлежности, вычисляются оценки соответствий между парами точек. В конечном итоге, итеративно назначая опорным каждое соответствие, определяются пары взаимосоответствующих точек, сохранивших структуру в наибольшем количестве итераций [26]. Так определяются истинные соответствия, а также параметры изменения масштаба, угла поворота и смещения сцены в кадре. Например, на рисунке 5 есть ложное соответствие и соединенные им точки помечены буквой «F» бирюзового цвета.

Следующим шагом, для осуществления нечеткого вывода, необходимо обработать полученные оценки соответствий для определения их истинности и ложности. Для этого формируется решающее правило в пространстве признаков на основе интуиционистских функций принадлежности. Решающее правило формируется в процессе обучения нейронной сети. Архитектура используемой сети относительно простая. Сеть содержит три слоя: входной, скрытый и выходной [27]. На вход сети поступает трехмерный вектор признаков, далее сигнал поступает на полносвязный скрытый слой. Третий слой сети – один выходной нейрон. Выходное значение сети варьируется в диапазоне $[0; 1]$. Если значение больше 0,5 – соответствие принадлежит ко множеству истинных, иначе – не принадлежит.

Для обучения использовался набор данных реальных изображений. При этом, разметка (истинные соответствия) была сформирована синтезированием из действительных данных: подобно методу геометрической адаптации. Набор данных состоит из пар изображений, где второе изображений из пары сформировано применением заранее известных преобразований матрицей гомографии к исходному (первому в паре) изображению. Формирование разметки возможно за счет использования матриц гомографии: каждое поступающее на вход модуля сопоставления соответствие проверялось на истинность по следующему правилу:

$$\begin{cases} match = true, \text{ когда } Euq(A * H, B) \leq 2, \\ match = false, \text{ иначе} \end{cases}$$

где $match$ – оцениваемое соответствие, A – координаты ОТ в исходном изображении, B – координаты ОТ в преобразованном изображении, H – матрица гомографии используемая при преобразовании, $Euq()$ – значение Эвклидова расстояния (дистанции) между ОТ; 2 – порог в пикселях, отличен от нуля, т.к. при на разных изображениях образ ОТ может меняться и положение ее центра может субпиксельно изменяться.

Результаты экспериментов. Для проведения экспериментов был сформирован тестовый набор данных, на основе открытого MegaDepth [27]. MegaDepth – это набор изображений архитектурных достопримечательностей и улиц различных городов Земли. Разметка была сформирована на основе подхода гомографической адаптации: к исходным изображениям были применены случайно сгенерированные матрицы гомографии и дополнительно искажения (дисторсия, изменения яркости) имитирующие аберрации оптической системы. Положения особых точек на новых изображениях были известны, т.к. были известны преобразования порождающие новые изображения [28]. Применение обратного преобразования позволяет оценить истинность сопоставленных точек, в соответствии с выражением (3). Таким образом, было сформировано примерно 62 тыс. тестовых пар изображений.

В эксперименте участвовали две цепочки сопоставления: SuperPoint+NN и SuperPoint+Fuzzy [29]. Обе цепочки используют ОТ вычисленные описанной выше архитектурой SuperPoint. Разница в модулях сопоставления вычисленных особых точек

SuperPoint+NN сопоставляет вычисленные ОТ по правилу выбора ближайшего соседа (nearest neighbor) с использованием подхода ratio check с порогом 4/5. Таким образом истинным соответствие считается, если два ближайших соседа для ОТ различаются больше чем на 20%.

SuperPoint+Fuzzy это предлагаемая в этой работе система. Принцип работы Fuzzy-сопоставителя описан выше.

В качестве оценок для сравнения были выбраны метрики Precision и Recall, вычисляемые по назначенным истинным соответствиям. Результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальной проверки.

Метод	Precision	Recall
SuperPoint+NN	24.3	58.2
SuperPoint+Fuzzy	48.2	52.7

Экспериментальная проверка показала положительный эффект от использования SuperPoint+Fuzzy цепочки: параметр Precision увеличился в два раза, что говорит о значительном снижении ложно выбранных соответствий в качестве истинных. Незначительное снижение показателя Recall обусловлено повышением «требовательности» цепочки к качеству сопоставления и отбрасывания некоторого количества погранично плохих, по критериям цепочки, соответствий.

Заключение. Представленная в данной работе обучаемая система для сопоставления изображений представляет собой современный и высокоэффективный инструмент, способный решать широкий спектр задач в области компьютерного зрения. Использование методов машинного обучения позволяет системе не только адаптироваться к различным типам и качеству визуальных данных, но и значительно улучшать точность сопоставления за счет выявления сложных закономерностей и особенностей изображений, недоступных традиционным алгоритмам.

В ходе исследования было показано, что такая система успешно справляется с задачами обнаружения признаков, описанием выделенных особенностей и последующим сопоставлением изображений, обеспечивая устойчивость к изменениям масштаба, поворота, освещенности и другим факторам, которые обычно вызывают затруднения. Кроме того, обучаемая модель предоставляет возможности для до обучения на новых данных, что делает её особенно ценным инструментом в условиях постоянно меняющейся среды и требований.

Практическая значимость разработанной системы заключается в её применении в различных сферах – от медицины и промышленного контроля до систем безопасности и анализа мультимедийного контента. Высокая скорость обработки и высокая точность сопоставления обеспечивают возможность её использования в реальном времени, что является критичным для многих приложений.

Таким образом, обучаемая система для сопоставления изображений не только расширяет существующие возможности обработки визуальной информации, но и закладывает основу для дальнейших исследований и внедрений в области интеллектуального анализа данных. Перспективы развития связаны с улучшением архитектуры нейронных сетей, оптимизацией алгоритмов обучения и интеграцией дополнительных источников данных, что позволит повысить как эффективность, так и универсальность таких систем в будущем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Balntas V., Lenc K., Vedaldi A., Mikolajczyk K.* Hpatches: A Benchmark and Evaluation of Handcrafted and Learned Local Descriptors // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2017. – P. 5173-5183.
2. *Chen H., Luo Z., Zhou L. [et al.]*. Aspanformer: Detector-free image matching with adaptive span transformer // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2022. – P. 5277-5287.
3. *Schonberger J.L., Frahm J.-M.* Structure from-motion revisited // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2016. – P. 4104-4113.
4. *Sun J., Shen Z., Wang Y., Bao H., Zhou X.* Loftr: Detector-free local feature matching with transformers // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2021. – P. 8918-8927.
5. *Truong P., Danelljan M., Van Gool L., Timofte R.* Learning accurate dense correspondences and when to trust them // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2021. – P. 5710-5720.
6. *DeTone D., Malisiewicz T., Rabinovich A.* Superpoint: Self-supervised interest point detection and description // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2018. – P. 224-236.
7. *Karpur A., Perrotta G., Martin-Brualla R. [et al.]*. Lfm-3d: Learnable feature matching across wide baselines using 3d signals // *Proceedings of the International Conference on 3D Vision (3DV)*. – Los Alamitos: IEEE, 2024. – P. 1234-1245.
8. *Зуев В.М.* Сравнение обнаружения объектов средствами искусственного интеллекта в сравнении с классическими методами // *Проблемы искусственного интеллекта*. – 2024. – № 3 (34). – С. 30-35.
9. *Dai A., Chang A.X., Savva M. [et al.]*. Scannet: Richly-annotated 3D reconstructions of indoor scenes // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2017. – P. 5828-5837.
10. *Silveira T.L., Jung C.R.* Dense 3D scene reconstruction from multiple spherical images for 3-DOF+ VR applications // *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. – Los Alamitos: IEEE, 2019. – P. 9-18.
11. *Tang L., Jia M., Wang Q. [et al.]*. Emergent correspondence from image diffusion // *arXiv*. 2023. arXiv:2306.03881.
12. *Torii A., Havlena M., Pajdla T.* From Google Street View to 3D city models // *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*. – Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2009. – P. 2188-2195.
13. *Tian Y., Fan B., Wu F.* L2-Net: Deep learning of discriminative patch descriptor in Euclidean space // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2017. – P. 661-669.
14. *Носков В.П., Курьянов А.Н.* Использование комплексированных дескрипторов в решении SLAM-задачи // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2022. – № 1 (225). – С. 268-278.
15. *Морев К.И., Божениук А.В.* Сопоставление изображений по особым точкам различных категорий // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2020. – № 3 (213). – С. 192-201.
16. *Truong P., Danelljan M., Van Gool L., Timofte R.* Learning accurate dense correspondences and when to trust them // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2021. – P. 5710-5720.
17. *Tyszkiewicz M., Maninis K.-K., Popov S., Ferrari V.* RayTran: 3D pose estimation and shape reconstruction of multiple objects from videos with ray-traced transformers // *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*. – Cham: Springer, 2022. – P. 456-472.
18. *Бондаренко В.А., Каплинский Г.Э., Павлова В.А., Тупиков В.А.* Метод поиска и сопоставления ключевых особенностей изображений для распознавания образов и сопровождения объектов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2019. – № 1 (203). – С. 281-293.

19. Vaswani A., Shazeer N.M., Parmar N. [et al.]. Attention is all you need // *Advances in Neural Information Processing Systems*. – Red Hook: Curran Associates, 2017. – P. 5998-6008.
20. Verdie Y., Yi K.M., Fua P., Lepetit V. TILDE: A temporally invariant learned detector // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2015. – P. 5263-5271.
21. Ma J., Jiang X., Fan A. [et al.]. Image matching from handcrafted to deep features: A survey // *International Journal of Computer Vision*. – 2020. – Vol. 129, No. 1. – P. 23-79.
22. Ono Y., Trulls E., Fua P.V., Yi K.M. LF-Net: Learning local features from images // *Advances in Neural Information Processing Systems*. – Red Hook: Curran Associates, 2018. – P. 6234-6244.
23. Radenovic F., Iscen A., Tolias G., Avrithis Y., Chum O. Revisiting Oxford and Paris: Large-scale image retrieval benchmarking // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2018. – P. 5706-5715.
24. Deng J., Dong W., Socher R. [et al.]. ImageNet: A large-scale hierarchical image database // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2009. – P. 248-255.
25. Atanassov K. Remark on a property of the intuitionistic fuzzy interpretation triangle // *Notes on Intuitionistic Fuzzy Sets*. – 2002. – No. 8 (1). – P. 34-36.
26. Roessle B., Nießner M. End2end multi-view feature matching with differentiable pose optimization // *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*. – Paris: IEEE, 2023. – P. 477-487.
27. Li Z., Snavely N. MegaDepth: Learning single-view depth prediction from internet photos // *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – Los Alamitos: IEEE, 2018. – P. 2041-2050.
28. Устенко В.Ю., Бондаренко В.И. Разработка программного комплекса аннотирования данных для задач компьютерного зрения: объектно-ориентированный подход на основе winforms // *Проблемы искусственного интеллекта*. – 2024. – № 4 (35). – С. 151-163.
29. Xue F., Budvytis I., Cipolla R. SFD2: Semantic-guided feature detection and description // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2023. – P. 5206-5216.

REFERENCES

1. Balntas V., Lenc K., Vedaldi A., Mikolajczyk K. Hpatches: A Benchmark and Evaluation of Handcrafted and Learned Local Descriptors, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2017, pp. 5173-5183.
2. Chen H., Luo Z., Zhou L. [et al.]. Aspanformer: Detector-free image matching with adaptive span transformer, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2022, pp. 5277-5287.
3. Schonberger J.L., Frahm J.-M. Structure from-motion revisited, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2016, pp. 4104-4113.
4. Sun J., Shen Z., Wang Y., Bao H., Zhou X. Loftr: Detector-free local feature matching with transformers, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2021, pp. 8918-8927.
5. Truong P., Danelljan M., Van Gool L., Timofte R. Learning accurate dense correspondences and when to trust them, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2021, pp. 5710-5720.
6. DeTone D., Malisiewicz T., Rabinovich A. Superpoint: Self-supervised interest point detection and description, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2018, pp. 224-236.
7. Karpur A., Perrotta G., Martin-Brualla R. [et al.]. Lfm-3d: Learnable feature matching across wide baselines using 3d signals, *Proceedings of the International Conference on 3D Vision (3DV)*. Los Alamitos: IEEE, 2024, pp. 1234-1245.
8. Zuev V.M. Sravnenie obnaruzheniya ob"ektov sredstvami iskusstvennogo intellekta v sravnenii s klassicheskimi metodami [Comparison of object detection using artificial intelligence methods versus classical methods], *Problemy iskusstvennogo intellekta* [Problems of Artificial Intelligence], 2024, No 3 (34), pp. 30-35.
9. Dai A., Chang A.X., Savva M. [et al.]. Scannet: Richly-annotated 3D reconstructions of indoor scenes, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2017, pp. 5828-5837.
10. Silveira T.L., Jung C.R. Dense 3D scene reconstruction from multiple spherical images for 3-DOF+ VR applications, *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. Los Alamitos: IEEE, 2019, pp. 9-18.

11. Tang L., Jia M., Wang Q. [et al.]. Emergent correspondence from image diffusion, *arXiv*. 2023. arXiv:2306.03881.
12. Torii A., Havlena M., Pajdla T. From Google Street View to 3D city models, *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2009, pp. 2188-2195.
13. Tian Y., Fan B., Wu F. L2-Net: Deep learning of discriminative patch descriptor in Euclidean space, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2017, pp. 661-669.
14. Noskov V.P., Kur'yanov A.N. Ispol'zovanie kompleksirovannykh deskriptorov v reshenii SLAM-zadachi [Using complex descriptors for SLAM task solution], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1 (225), pp. 268-278.
15. Morev K.I., Bozhenyuk A.V. Sopostavlenie izobrazheniy po osobym tochkam razlichnykh kategoriy [Image matching by feature points of various categories], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 3 (213), pp. 192-201.
16. Truong P., Danelljan M., Van Gool L., Timofte R. Learning accurate dense correspondences and when to trust them, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2021, pp. 5710-5720.
17. Tyszkiewicz M., Maninis K.-K., Popov S., Ferrari V. RayTran: 3D pose estimation and shape reconstruction of multiple objects from videos with ray-traced transformers, *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*. Cham: Springer, 2022, pp. 456-472.
18. Bondarenko V.A., Kaplinskiy G.E., Pavlova V.A., Tupikov V.A. Metod poiska i sopostavleniya klyuchevykh osobennostey izobrazheniy dlya raspoznavaniya obrazov i soprovozhdeniya ob'ektov [Method of search and matching of key image features for pattern recognition and object tracking], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1 (203), pp. 281-293.
19. Vaswani A., Shazeer N.M., Parmar N. [et al.]. Attention is all you need, *Advances in Neural Information Processing Systems*. Red Hook: Curran Associates, 2017, pp. 5998-6008.
20. Verdie Y., Yi K.M., Fua P., Lepetit V. TILDE: A temporally invariant learned detector, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2015, pp. 5263-5271.
21. Ma J., Jiang X., Fan A. [et al.]. Image matching from handcrafted to deep features: A survey, *International Journal of Computer Vision*, 2020, Vol. 129, No. 1, pp. 23-79.
22. Ono Y., Trulls E., Fua P.V., Yi K.M. LF-Net: Learning local features from images, *Advances in Neural Information Processing Systems*. Red Hook: Curran Associates, 2018, pp. 6234-6244.
23. Radenovic F., Iscen A., Tolias G., Avrithis Y., Chum O. Revisiting Oxford and Paris: Large-scale image retrieval benchmarking, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2018, pp. 5706-5715.
24. Deng J., Dong W., Socher R. [et al.]. ImageNet: A large-scale hierarchical image database, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2009, pp. 248-255.
25. Atanassov K. Remark on a property of the intuitionistic fuzzy interpretation triangle, *Notes on Intuitionistic Fuzzy Sets*, 2002, No. 8 (1), pp. 34-36.
26. Roessle B., Nießner M. End2end multi-view feature matching with differentiable pose optimization, *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*. Paris: IEEE, 2023, pp. 477-487.
27. Li Z., Snavely N. MegaDepth: Learning single-view depth prediction from internet photos, *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE, 2018, pp. 2041-2050.
28. Ustenko V.Yu., Bondarenko V.I. Razrabotka programmnoy kompleksa annotirovaniya dannykh dlya zadach komp'yuternogo zreniya: ob'ektno-orientirovanny podkhod na osnove winforms [Development of data annotation software complex for computer vision tasks: object-oriented approach based on WinForms], *Problemy iskusstvennogo intellekta* [Problems of Artificial Intelligence], 2024, No. 4 (35), pp. 151-163.
29. Xue F., Budvytis I., Cipolla R. SFD2: Semantic-guided feature detection and description, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2023, pp. 5206-5216.

Морев Кирилл Иванович – Акционерное общество Научно-конструкторское бюро вычислительных систем; e-mail: morev-ki@ya.ru; г. Таганрог, Россия; программист.

Morev Kirill Ivanovich – Joint Stock Company "Scientific Design Bureau of Computing Systems"; e-mail: morev-ki@ya.ru; Taganrog, Russia; programmer.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

С полными требованиями к рукописи, перечнем сопроводительных документов и образцом оформления статьи можно ознакомиться на сайте журнала:

https://izv-tn.tti.sfedu.ru/index.php/izv_tn/authorrequirements.

1. Объём статьи – от 12 до 20 страниц формата А4, включая рисунки, таблицы и список литературы (для обзорных статей – от 20 до 30 страниц). Основной текст статьи должен быть набран шрифтом Times New Roman размером 10 пунктов с одинарным интервалом.

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 объёмом **200-250 слов**.

Аннотация должна содержать: актуальность исследования (постановка проблемы); цель и задачи работы; используемые методы и подходы; – основные результаты (с конкретикой, без общих формулировок); выводы и значимость работы.

4. Статья должна быть структурирована и включать: введение, постановку задачи, методику исследования, результаты и их обсуждение (или вычислительный эксперимент), выводы.

5. Все графические материалы (графики, диаграммы, фотографии) должны быть пронумерованы и снабжены подписями. Таблицы также нумеруются и имеют названия. Формулы должны быть набраны в редакторе формул.

6. Наличие библиографического списка на русском и английском языках обязательно. Все источники указываются в тексте в порядке возрастания. Должно быть не менее **20 источников** (для обзорных статей – не менее 40): 75% источников – не старше 10 лет; 25% источников – допускаются старше 10 лет (классические/базовые работы). Ссылки оформляются по ГОСТ Р 7.0.5-2008, в тексте заключаются в квадратные скобки.

7. Оригинальность текста статьи должна составлять не менее 70% по результатам проверки в системе антиплагиата. Объём самоцитирования не должен превышать 20% от общего объёма статьи. Автор обязан предоставить справку-отчёт системы антиплагиат (желательно **antiplagiat.ru**).

8. Статья сопровождается сведениями об авторе(ах) (фамилия, имя, отчество, учёное звание, должность, место работы, адрес, электронный адрес и номер телефона) на русском и английском языках, а также необходимыми сопроводительными документами в соответствии с требованиями журнала.

9. Срок рассмотрения статьи, соответствующей всем требованиям, составляет до 3 месяцев, с момента направления статьи на рецензирование.

10. Публикация в журнале для авторов бесплатна. Редакция не взимает плату с авторов за подготовку, размещение и печать материалов.

Статьи, не соответствующие требованиям журнала, возвращаются авторам на доработку до направления на рецензирование.