



№3-2024

ISSN 1999-9429

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Вычислительные и информационно-управляющие системы
- Алгоритмы обработки информации
- Моделирование процессов и систем
- Электроника, нанотехнологии и приборостроение

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

№ 3 (239). 2024 г.

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

Редакционный совет

Курейчик В.В. (гл. редактор); Кравченко Ю.А. (зам. гл. редактора); Бородянский И.М. (ученый секретарь); Абрамов С.М.; Агеев О.А.; Бабенко Л.К.; Боженюк А.В.; Веселов Г.Е.; Гайдук А.Р.; Горбанёва О.И.; Каляев И.А.; Коноплев Б.Г.; Касьянов А.О.; Левин И.И.; Куповых Г.В.; Лысенко И.Е.; Малюков С.П.; 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.; Семенихина Д.В.; Сергеев Н.Е.; Стемпковский А.Л.; Сухинов А.И.; Тополов В.Ю.; Турулин И.И.; Угольницкий Г.А.; Усов А.Б.; Федосов В.П.; Целых А.Н.; Юханов Ю.В.

Учредитель Южный федеральный университет.

Издатель Южный федеральный университет.

Ответственный за выпуск Клевцов С.И.

Технический редактор Ярошевич Н.В.

Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Дата выхода в свет 19.07. 2024 г. Формат $70 \times 108 \frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 24,9. Уч.-изд. л. – 17,5.

Заказ № 9593. Тираж 250 экз.

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

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

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

16+

Цена свободная

ISSN 1999-9429 (Print)

ISSN 2311-3103 (Online)

© Южный федеральный университет, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

К.Ч. Бжихатлов, И.А. Пшенокова, А.Р. Макоев КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА БАЗЕ НЕЙРОКОГНИТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ.....	6
С.Г. Емельянов, С.Н. Фролов, Е.А. Титенко, Д.П. Тетерин, А.П. Локтионов АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКОНФИГУРАЦИИ ГРУППИРОВКИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	18
Л.К. Хаджиева, В.В. Котенко, К.Е. Румянцев НЕЙРОЛИНГВИСТИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ	33
С.С. Носков, А.Ю. Баранник, А.А. Лебедев, А.В. Лагутина ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДА РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ГУМАНИТАРНОГО РАЗМИНИРОВАНИЯ.....	44

РАЗДЕЛ II. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Л.К. Бабенко, В.С. Стародубцев ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ КРИПТОАНАЛИЗА ГОМОМОРФНЫХ ШИФРОВ, ОСНОВАННЫХ НА ЗАДАЧЕ ФАКТОРИЗАЦИИ ЧИСЕЛ.....	55
Д.И. Бакшун, И.И. Турулин МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУРЫ РЕКУРСИВНОГО ФИЛЬТРА С КОНЕЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ В ВИДЕ ФУНКЦИИ, АППРОКСИМИРУЮЩЕЙ ОКНО ХАННА.....	64
Е.М. Герасименко, В.В. Стеценко ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОНАЛЬНОСТИ ТЕКСТА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ МОДИФИКАТОРОВ ИНТЕНСИВНОСТИ И ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКИХ ПРАВИЛ...	71
А.О. Касьянов, М.В. Поттпак ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССОРА ДЛЯ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ.....	79
П.Г. Криницин, С.В. Ченцов ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ СМАЗКИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ КЛАССИФИКАЦИИ.....	92
В.В. Курейчик, А.Ю. Халенков КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОИСК ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДВУМЕРНОЙ УПАКОВКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФИГУР СЛОЖНЫХ ФОРМ.....	98
С.Н. Мелешкин, И.Б. Силес ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ С ПОВОРОТОМ СИГНАЛЬНОГО СОЗВЕЗДИЯ В СТАНДАРТЕ DTMF НА БАЗЕ SIMULINK МОДЕЛИ В СРЕДЕ MATLAB	107
К.Е. Румянцев, Я.К. Миронов, П.Д. Миронова ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХЭТАПНОГО АЛГОРИТМА СИНХРОНИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ВЫБОРА СМЕЖНОЙ ПАРЫ СЕГМЕНТОВ С МАКСИМАЛЬНЫМ СУММАРНЫМ ОТСЧЁТОМ В СИСТЕМЕ КРК	118
А.О. Новиков, Э.И. Вагутин, С.И. Егоров, В.С. Титов ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ДАББАГЯНА-ВУ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ НЕЦИКЛИЧЕСКИХ ПАНДИАГОНАЛЬНЫХ ЛАТИНСКИХ КВАДРАТОВ	126
С. Сингх, А.В. Прибыльский АЛГОРИТМ КЛАССИФИКАЦИИ ПОЖАРООПАСНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	138

С.И. Родзин, А.В. Боженюк, Е.В. Нужнов МЕТОД МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ГРУППОВОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКИХ КОЛЕБЛЮЩИХСЯ МНОЖЕСТВ	147
К.О. Север, К.Н. Алексеев, И.И. Турулин РЕАЛИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОГО РАЗДЕЛИМОГО ДВУМЕРНОГО ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА НА ПЛИС	158
В.А. Цыганков, О.А. Шабалина, А.В. Катаев ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗМЕРА ПОПУЛЯЦИИ НА БЫСТРОДЕЙСТВИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА	168
А.П. Плёткин НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫЙ ДОСТУП К СИСТЕМЕ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ.....	176
А.М. Мансур АЛГОРИТМ НА ОСНОВЕ ТРАНСФОРМЕРОВ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ДЛИННЫХ ТЕКСТОВ.....	187

РАЗДЕЛ III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

А.А. Марьев МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КВАДРАТУРНОГО СТРОБОСКОПИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ	197
Н.К. Полуянович, О.В. Качелаев, М.Н. Дубяго, С.Б. Мальков ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ С АТИПИЧНЫМ ХАРАКТЕРОМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ...	207
Т.В. Сазонова, М.С. Шелагурова ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ НАВИГАЦИИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ДАННЫЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ.....	219
В.В. Дядичев, С.Г. Менюк, Д.С. Менюк РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА ОТ БАССЕЙНА ВЫДЕРЖКИ С ДВУХФАЗНЫМ КОЛЬЦЕВЫМ ТЕРМОСИФОНОМ	230
А.В. Козловский, Э.В. Мельник, А.Н. Самойлов ПРИМЕНЕНИЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ПОПОЛНЕНИЯ БАЗЫ ЗНАНИЙ О МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ ПРИКЛАДНОЙ ФОТОГРАММЕТРИИ	243
А.А. Яковлев, М.Ю. Серов, Р.В. Сахабудинов, А.С. Голосий МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРЯДНОГО КОНТУРА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО СТЕНДА МОЛНИЕВОГО РАЗРЯДА.....	252

РАЗДЕЛ IV. ЭЛЕКТРОНИКА, НАНОТЕХНОЛОГИИ И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Н.М. Богатов, В.С. Володин, Л.Р. Григорьян, М.С. Коваленко ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ <i>N-P</i> ПЕРЕХОДА	266
Р.Э. Косак, А.В. Геворкян КОМПАКТНЫЙ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ВИВАЛЬДИ КАРДИОИДНОЙ ФОРМЫ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ИМПЕДАНСНЫМИ ВСТАВКАМИ.....	276

CONTENT

SECTION I. COMPUTING AND INFORMATION MANAGEMENT SYSTEMS

K.Ch. Bzhikhatlov, I.A. Pshenokova, A.P. Makoev NEUROCOGNITIVE ALGORITHMS FOR MANAGING MULTI-AGENT ROBOTICS SYSTEM FOR AGRICULTURAL PURPOSES	6
S.G. Emelyanov, S.N. Frolov, E.A. Titenko, D.P. Teterin, A.P. Loktionov HARDWARE AND SOFTWARE MEANS FOR DYNAMIC RECONFIGURATION OF A GROUP OF SMALL SPACE VEHICLES.....	19
L.K. Khadzhieva, V.V. Kotenko, K.E. Rummyantsev NEUROLINGUISTIC INFORMATION IDENTIFICATION OF INTELLIGENT SYSTEMS.....	33
S.S. Noskov, A.Yu. Barannik, A.A. Lebedev, A.V. Lagutina THE PROCEDURE FOR CALCULATING THE DRIVE OF THE WORKING BODY OF A ROBOTIC DEVICE FOR HUMANITARIAN DEMINING	45

SECTION II. INFORMATION PROCESSING ALGORITHMS

L.K. Babenko, V.S. Starodubtsev FEATURES OF THE IMPLEMENTATION OF THE CRYPTANALYSIS SYSTEM OF HOMOMORPHIC CIPHERS BASED ON THE PROBLEM OF FACTORIZATION OF NUMBERS	55
D.I. Bakshun, I.I. Turulin A TECHNIQUE FOR CONSTRUCTING THE STRUCTURE OF A RECURSIVE FILTER WITH A FINITE IMPULSE RESPONSE IN THE FORM OF A FUNCTION APPROXIMATING THE HANN WINDOW	65
E.M. Gerasimenko, V.V. Stetsenko TEXT SENTIMENT ANALYSIS BASED ON FUZZY RULES AND INTENSITY MODIFIERS	71
A.O. Kasyanov, M.V. Potipak USING A GPU FOR REAL-TIME DIGITAL SIGNAL PROCESSING	79
P.G. Krinitsin, S.V. Chentsov ASSESSMENT OF THE LUBRICATION CONDITION OF ROLLING BEARINGS USING CLASSIFICATION ALGORITHMS.....	92
V.V. Kureichik, A.J. Khalenkov COMBINED SEARCH FOR SOLVING THE PROBLEM OF TWO-DIMENSIONAL PACKING OF GEOMETRIC FIGURES OF COMPLEX FORMS	99
S.N. Meleshkin, I.B. Siles STUDY OF MODIFIED ALGORITHMS WITH SIGNAL CONSTELLATION ROTATION IN DTMB STANDARD ON THE BASIS OF SIMULINK MODEL IN MATLAB ENVIRONMENT.....	108
K.Ye. Rummyantsev, Ya.K. Mironov, P.D. Mironova EVALUATION OF THE CHARACTERISTICS OF A TWO-STAGE SYNCHRONIZATION ALGORITHM BASED ON THE SELECTION OF AN ADJACENT PAIR OF SEGMENTS WITH THE MAXIMUM TOTAL COUNT IN THE QKD SYSTEM.....	118
A.O. Novikov, E.I. Vatutin, S.I. Egorov, V.S. Titov RESEARCH OF THE DABBAGHIAN-WU ALGORITHM FOR CONSTRUCTING NON- CYCLIC PANDIAGONAL LATIN SQUARES.....	126
S. Singh, A.V. Pribylskiy ALGORITHM FOR CLASSIFICATION OF FIRE HAZARDOUS SITUATIONS BASED ON NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES.....	138
S.I. Rodzin, A.V. Bozhenyuk, E.V. Nuzhnov METHOD OF MULTI-CRITERIA GROUP DECISION-MAKING IN AN EMERGENCY SITUATION USING FUZZY HESITANT SETS.....	148

K.O. Sever, K.N. Alekseev, I.I. Turulin	
IMPLEMENTATION OF AN EFFICIENT SEPARABLE VECTOR DIGITAL FILTER ON FPGA.....	158
V.A. Tsygankov, O.A. Shabalina, A.V. Kataev	
INVESTIGATION OF THE IMPACT OF POPULATION SIZE ON THE PERFORMANCE OF A GENETIC ALGORITHM.....	168
A.P. Pljonkin	
UNAUTHORIZED ACCESS TO QUANTUM KEY DISTRIBUTION SYSTEM.....	177
A.M. Mansour	
A TRANSFORMER-BASED ALGORITHM FOR CLASSIFYING LONG TEXTS	187
SECTION III. PROCESS AND SYSTEM MODELING	
A.A. Maryev	
MATHEMATICAL MODEL OF A QUADRATURE SAMPLING FREQUENCY CONVERTER.....	197
N.K. Poluyanovich, O.V. Kachelaev, M.N. Dubyago, S.B. Malkov	
OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE OF THE ENERGY CONSUMPTION FORECASTING SYSTEM WITH ATYPICAL ENERGY CONSUMPTION PATTERNS	207
T.V. Sazonova, M.S. Shelagurova	
INVESTIGATION OF ACCURACY CHARACTERISTICS OF NAVIGATION SYSTEMS USING REMOTE SENSING DATA.....	219
V.V. Dyadichev, S.G. Menyuk, D.S. Menyuk	
DEVELOPMENT OF A COMPUTER MODEL FOR IMPROVING THE SYSTEM OF PASSIVE HEAT REMOVAL FROM THE HOLDING POOL WITH A TWO-PHASE RING THERMOSIPHON.....	231
A.V. Kozlovskiy, E.V. Melnik, A.N. Samoylov	
A LARGE LANGUAGE MODELS APPLICATION IN ORGANIZATION OF REPLENISHMENT OF THE KNOWLEDGE BASE ON METHODS OF INFORMATION PROCESSING IN SYSTEMS OF APPLIED PHOTOGRAMMETRY	243
A.A. Yakovlev, M.Yu. Serov, R.V. Sakhabudinov, A.S. Golosiy	
REVEALING THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF THE DISCHARGE CIRCUIT FOR A HIGH-VOLTAGE LIGHTNING DISCHARGE STAND.....	253
SECTION IV. ELECTRONICS, NANOTECHNOLOGY AND INSTRUMENTATION	
N.M. Bogatov, V.S. Volodin, L.R. Grigoryan, M.S. Kovalenko	
INFLUENCE OF SURFACE STATES ON THE ELECTRIC FIELD OF THE JUNCTION.....	266
R.E. Kosak, A.V. Gevorkyan	
COMPACT ULTRA-WIDEBAND CARDIOID VIVALDI RADIATOR WITH RECTANGULAR IMPEDANCE INSERTS.....	276

Раздел I. Вычислительные и информационно-управляющие системы

УДК 004.81: 004.75

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-6-18

К.Ч. Бжихатлов, И.А. Пшенокова, А.Р. Макоев

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА БАЗЕ НЕЙРОКОГНИТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ

Основными целями внедрения роботов в сельское хозяйство являются повышение эффективности и производительности, выполнение трудоемких и опасных задач и решение вопроса нехватки рабочей силы. Технологические достижения в области обнаружения и управления, а также машинного обучения позволили автономным роботам выполнять больше сельскохозяйственных задач. Такие задачи варьируются на всех этапах выращивания: от подготовки земли и посева до мониторинга и сбора урожая. Некоторые сельскохозяйственные роботы уже доступны, и ожидается, что в ближайшие годы их станет еще больше, поскольку технологии обработки больших данных, машинного зрения и легкого захвата и становятся все более точными. В настоящее время все большую актуальность приобретает внедрение нескольких взаимодействующих роботов в полевых условиях, так как оно имеет хорошие перспективы в снижении производственных затрат и повышении операционной эффективности. Целью данного исследования является разработка интеллектуальной системы управления группой мобильных роботов на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. Задача исследования состоит в разработке нейрокогнитивных алгоритмов управления мультиагентной робототехнической системой сельскохозяйственного назначения. В работе описан мультиагентный робототехнический комплекс для активной защиты растений в рамках системы «умного» поля. Представлена концепция системы управления группой мобильных роботов на основе моделирования мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. Для обеспечения работы многоагентной гетерогенной группы автономных роботов предлагается использование нейрокогнитивной модели управления с реализацией отдельных интеллектуальных агентов как на каждом отдельном роботе, так и на базовых станциях обслуживания или серверах. При этом, учитывая реализацию рекурсивности в самой архитектуре, задача масштабирования подобной системы управления заметно упрощается. Использование агентов сенсоров и эффекторов для обеспечения обмена знаниями между роботами и центрами принятия решений позволяет минимизировать нагрузку на систему связи и обеспечить запас отказоустойчивости системы управления. Полученные результаты могут быть применены для разработки универсальных систем управления и упрощения масштабирования для различных групп автономных роботов.

Автономный робот; нейрокогнитивная архитектура; системы коллективного управления; мультиагентные системы.

K.Ch. Bzhikhatlov, I.A. Pshenokova, A.P. Makoev

NEUROCOGNITIVE ALGORITHMS FOR MANAGING MULTI-AGENT ROBOTICS SYSTEM FOR AGRICULTURAL PURPOSES

The main goals of the introduction of robots into agriculture are to increase efficiency and performance, fulfilling labor-intensive and dangerous tasks and solving the issue of lack of labor. Technological achievements in the field of detection and management, as well as machine learning allowed autonomous robots to perform more agricultural tasks. Such tasks vary at all stages of cultivation: from preparation of land and sowing to monitoring and harvesting. Some agricultural robots are already available, and it is expected that in the coming years there will be even more, since technologies for processing big data,

machine vision and easy capture are becoming more accurate. Currently, the introduction of several interacting robots in the field is becoming increasingly relevant, since it has good prospects in reducing production costs and increasing operating efficiency. The purpose of this study is to develop an intellectual system for managing a mobile robot group based on multi-agent neurocognitive architectures. The task of the study is to develop neurocognitive algorithms for controlling the multi-agent robotics system of agricultural purposes. The work describes a multi-agent robotics complex for active plant protection within the framework of the Smart Field system. The concept of the management system of the group of mobile robots based on modeling multi-group neurocognitive architectures is presented. To ensure the work of the multi-agent heterogeneous group of autonomous robots, the use of a neurocognitive control model with the implementation of individual intellectual agents is proposed on each individual robot and at the bases of service or servers. At the same time, given the implementation of recursing in architecture itself, the task of scaling such a management system is noticeably simplified. The use of sensors and effectors to ensure the exchange of knowledge between robots and decision-making centers allows minimizing the load on the communication system and ensure a reserve of failure tolerance of the management system. The results obtained can be used to develop universal control systems and simplification for various groups of autonomous robots.

Autonomous robot; neurocognitive architecture; collective control systems; multi-agent systems.

Введение. В настоящее время, в связи с необходимостью более эффективных и устойчивых методов ведения сельского хозяйства, активно развивается подход, известный как «точное земледелие». Точное земледелие – определяется как стратегия управления, которая использует электронную информацию и другие технологии для сбора, обработки и анализа пространственных и временных данных с целью руководства целевыми действиями, повышающими эффективность, производительность и устойчивость сельскохозяйственных операций [1]. Этот подход позволяет собирать с помощью стационарных датчиков и автономных агентов (таких как роботы и беспилотное сельскохозяйственное оборудование) более точную информацию о здоровье растений, качестве почвы, урожайности и других аспектах сельского хозяйства, которые ранее отслеживались вручную в течение десятилетий [2, 3].

В работах [4–6] приведены систематические обзоры, которые широко освещают исследования в области сельскохозяйственных роботов. Обзоры, посвященные кооперативному взаимодействию роботов в контексте сельского хозяйства приведены в [7, 8]. Во всех этих исследованиях представлены возможности применения сельскохозяйственной робототехники. Основными целями внедрения роботов в сельское хозяйство являются повышение эффективности и производительности, выполнение трудоемких и опасных задач и решение вопроса нехватки рабочей силы. Технологические достижения в области обнаружения и управления, а также машинного обучения позволили автономным роботам выполнять больше сельскохозяйственных задач. Такие задачи варьируются на всех этапах выращивания: от подготовки земли и посева до мониторинга и сбора урожая. Некоторые сельскохозяйственные роботы уже доступны, и ожидается, что в ближайшие годы их станет еще больше, поскольку технологии обработки больших данных, машинного зрения и легкого захвата и становятся все более точными. В настоящее время все большую актуальность приобретает внедрение нескольких взаимодействующих роботов в полевых условиях, так как оно имеет хорошие перспективы в снижении производственных затрат и повышении операционной эффективности.

Кооперация в сельскохозяйственной робототехнике можно условно разделить на следующие группы: человеко-машинное взаимодействие (ЧМК), взаимодействие беспилотных летательных аппаратов (мульти-БПЛА), взаимодействие наземных роботизированных комплексов и гибридные команды БПЛА и РК.

В ЧМК разработка систем кооперативного управления направлены на улучшение сенсорных ограничений существующих систем машинного зрения и роботизированное сопровождение ручного труда. В первом случае человек-оператор дополняет возможности автоматического обнаружения и распознавания объектов автономным роботом, выполняя дополнительную проверку и коррекцию восприятия робота. Во втором случае, робот выступает в роли помощника, для решения трудных и, возможно, опасных задач. Так, для улучшения показателей обнаружения фруктов в неструктурированной сельско-

хозяйственной среде в работе [9] было изучено взаимодействие человека и робота на разных уровнях автономии, которое в [10] было расширено за счет динамического переключения между различными уровнями автономии в режиме реального времени. В работе [11] представлен коллаборативный опрыскиватель «человек-робот» для целенаправленного распыления на конкретном объекте, где совместная задача обнаружения целей решается с помощью выбранного пользователем уровня автономии. Исследования по разработке человеко-машинного интерфейса для опрыскивания виноградников можно найти в [12]. В [13] разработана система диспетчерского управления сельскохозяйственным транспортным средством, в которой человек может определять высокоуровневые цели или команды, которые робот должен выполнять автономно. Протокол коллаборативного управления для маршрутизации роботов представлен в [14]. В работах [15, 16] разработана гибридная модель на основе автоматов для роботизированных операций по транспортировке урожая, чтобы сократить непродуктивное время ходьбы сборщиков. В работе [17] представлен алгоритм эффективного планирования задач, основанный на оптимизации, по выполнению таких операций, как обрезка, осмотр или опрыскивание под наблюдением человека.

Во всех представленных примерах человеко-машинного взаимодействия вопрос об уровне автономности робота и разделении труда между человеком и роботом остается открытым. Этот баланс зависит от характера выполняемой задачи, поскольку эффективность, результативность и точность робота варьируются для каждой функции.

В таких задачах как дистанционное зондирование, картографирование, мониторинг и борьба с вредителями активно используются БПЛА. Однако, использование одного БПЛА для этих задач сопряжено с определенными ограничениями, такими как, эффективность использования времени и батареи [18]. Во-первых, время, необходимое одному транспортному средству для преодоления большой площади, может быть большим. Во-вторых, из-за увеличенной продолжительности выполнения задачи и рабочей нагрузки требования к энергии могут заставить БПЛА покрывать лишь небольшую площадь между частыми подзарядками. Для решения этих проблем целесообразно использовать команды взаимодействующих БПЛА. В случае работы мульти-БПЛА область покрытия и, следовательно, рабочая нагрузка, делится между БПЛА, которые координируют свои движения, сокращают энергопотребление и время выполнения работы. В работе [19] представлен обзор исследований беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве.

Имитационное моделирование коллективного поведения команды БПЛА для мониторинга сорняков и картографирования представлено в [20]. Система реализует стохастическое покрытие и картографирование, которое включает в себя предотвращение столкновений между летательными аппаратами и бортовое видение. Принятая стратегия мониторинга заключалась в том, чтобы сначала разделить поле на клетки и назначить каждому агенту путь, основанный на случайном блуждании. Затем отдельный агент принимает решение о перемещении в соседние клетки в соответствии с вероятностью, определяемой распределением Гаусса.

В работе [21] представлены имитационные исследования и эксперименты с использованием четырех квадрокоптерных летательных аппаратов для оценки алгоритма роевого интеллекта управления сельскохозяйственных БПЛА при обнаружении вредителей и болезней. при этом подходе управление реализовывалось на двух уровнях: первый уровень представлял собой дистанционное управление, где человек-оператор устанавливал управление скоростью, а на втором уровне происходило управление построением, а также предотвращением столкновений.

В [22] сравнивались четыре конфигурации сельскохозяйственных БПЛА: автономные и дистанционно управляемые одиночные и множественные команды БПЛА. Для оценки производительности системы в качестве метрик использовались общее время, время настройки, время полета, расход заряда батареи, неточность определения местности, тактильное усилие управления и коэффициент покрытия. Результаты экспериментов показали, что использование алгоритма автономного управления роем повысило эффективность выполнения сельскохозяйственной задачи.

Так как БПЛА, как правило, оснащены различными камерами и датчиками и используются для мониторинга, обнаружения вредителей и картографирования исследования в этой области в основном сосредоточены на планировании и координации траектории и алгоритмах предотвращения столкновений, которые учитывают пространственное расположение и ограничения батареи. По мере того, как будут появляться новые технологические инструменты, будущие исследования будут сосредоточены на расширении полезности БПЛА за счет улучшения их способности восприятия и автономности батареи, а также улучшения навыков манипулирования.

В настоящее же время эту проблему можно решить, используя в сельском хозяйстве коллаборативную систему, состоящую из группы наземных роботов и БПЛА [23]. Так, в [24] представлена биоинспирированная стратегия планирования траектории для координации гибридной (воздушной и наземной) команды из нескольких роботов. В этой стратегии, исследованной с помощью имитационной модели, трехмерный ландшафт был смоделирован в виде топологической карты нейронов, а алгоритм метаэвристической оптимизации «стрекоза» оптимизировал движения роботов.

В работе [25] представлен другой подход к управлению командой роботов. Авторами представлена команда сельскохозяйственных роботов, состоящая из трех беспилотных летательных аппаратов и одного беспилотного наземного робота. Каждый робот смоделирован как конечный автомат, а вся система из нескольких роботов – как дискретная событийная система. Система управления включает в себя диспетчерский контроллер, позволяющий гетерогенным сельскохозяйственным роботам выполнять полевые операции, избегать препятствий, следовать по определенному строю и следовать по заданному пути.

Другие подходы к координации наземных роботов и БПЛА можно найти в работах [26–28]. В рассмотренной литературе, чаще всего представлены две стратегии сотрудничества. В первом случае БПЛА помечают интересующие области после чего наземные роботы выполняют необходимые операции. Во втором случае, наземные роботы служат в качестве посадочных и зарядных станций для БПЛА.

Целью данного исследования является разработка интеллектуальной системы управления группой мобильных роботов на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур.

Задача исследования состоит в разработке нейрокогнитивных алгоритмов управления мультиагентной робототехнической системой сельскохозяйственного назначения.

Использование мультиагентных нейрокогнитивных архитектур позволит разрабатывать универсальные системы управления и упростить масштабирование системы для различных групп автономных роботов.

Мультиагентная робототехническая система для системы «умного» поля. В работе рассматривается применение гетерогенного комплекса автономных роботов, предназначенных для ухода за посевами в рамках концепции точного земледелия – системы «умного» поля [29]. Подобные системы предполагают внедрение интеллектуальных систем управления сельскохозяйственными процессами на разных этапах производства продукции. Архитектура разрабатываемой системы «умного» поля приведена на рис. 1. В качестве источников данных предполагается использование различных сенсорных систем, в частности, применение стационарных метеостанций для мониторинга состояния окружающей среды и почвы, использование данных мультиспектральной съемки с искусственных спутников земли, анализ видеопотоков с камер наблюдения, а также обработка данных лабораторных анализов почвы и растений. В качестве воздействующих устройств (а также дополнительных источников данных) могут служить различные автономные роботы (стационарные, наземные или воздушные), а также навесное оборудование для сельскохозяйственной техники. Учитывая большой объем данных, генерируемых подобной системой и сложность принятия решений в частично наблюдаемой среде, для управления всем комплексом участников робототехнического коллектива используется

интеллектуальная система обработки данных и принятия решений, обеспечивающая комплексирование многомодальных данных, их обработку, прогнозирование развития условий внешней среды и состояния посевов, определение наиболее оптимальных режимов обработки посевов, а также управления автономными мобильными роботами.

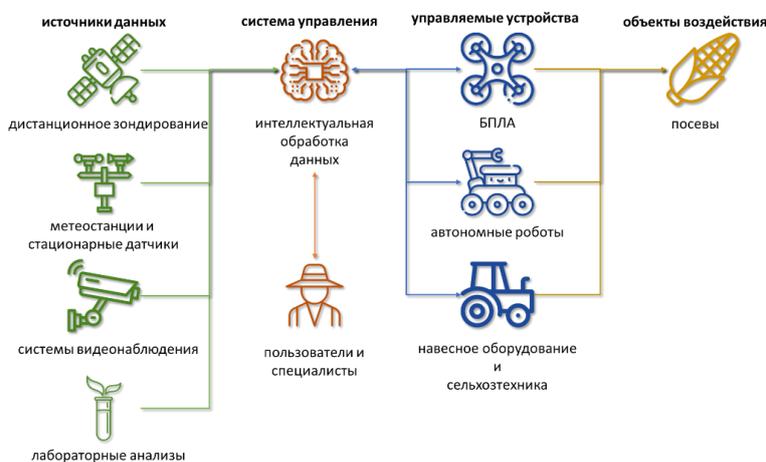


Рис. 1. Архитектура интеллектуальной системы для выращивания сельскохозяйственной продукции (стрелками показаны потоки данных и управляющих воздействий)

В рамках исследований был разработан ряд автономных мобильных роботов сельскохозяйственного назначения, в частности роботы для мониторинга и ухода за посевами зерновых культур. Общая концепция системы мониторинга и ухода за посевами показана на рис. 2. На данном рисунке показаны элементы робототехнической системы, предназначенной для мониторинга состояния и защиты посевов кукурузы от вредителей и сорных растений.

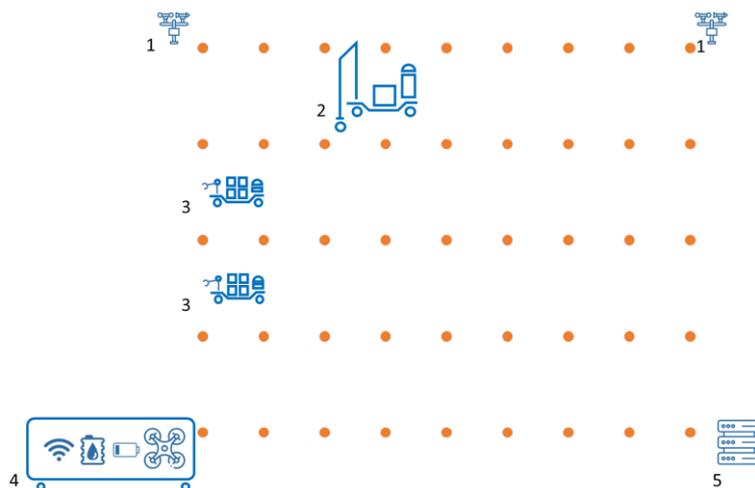


Рис. 2. Концепция системы мониторинга и ухода за посевами зерновых культур: 1 – метеостанции, 2 – робот для мониторинга и защиты посевов, 3 – роботы для транспортировки, 4 – базовая робототехническая станция обеспечения, 5 – внешний сервер системы управления

За сбор метеоданных отвечают стационарные метеостанции, расположенные на каждом отдельном участке для мониторинга состава и состояния почвы. В качестве основного воздействующего устройства выступает универсальная транспортная платформа, которая может выступать в роли робота для отбора проб почвы и мониторинга состояния посевов, а также в роли автономной системы для внесения удобрений и опрыскивания. Для перемещения носителей энергии, баков с агрохимией и заборов проб используются более легкие транспортировочные роботы. За обеспечение автономности всех участников робототехнического коллектива отвечает базовая робототехническая станция, выполняющая задачи по аккумулярованию электроэнергии, хранению аккумуляторов и баков с активными веществами, а также обеспечение связи и управления роботами. Базовая станция также может выступать в роли места зарядки и заправки БПЛА, участвующих в мониторинге состояния посевов. Также базовая станция отвечает за связь с внешним сервером системы управления, который находится за пределами поля и отвечает за обработку данных и принятия решений. На рис. 3 показан внешний вид универсальной транспортной платформы с установленными на ней опусками системы опрыскивания.



Рис. 3. Внешний вид автономного робота для защиты растений с установленными на нем опусками системы опрыскивания (во время испытаний в посевах кукурузы в КБР)

Робот для защиты растений реализован в виде узкой транспортной платформы, с одной или двумя П-образными арками [30]. На транспортной платформе установлены мотор колеса и актуаторы поворота для обеспечения перемещения робота и его полезной нагрузки по полю. Также в носовой части расположен блок с оборудованием (системы энергообеспечения, связи и бортовая ЭВМ). Также на ней установлены сенсоры, обеспечивающие навигацию и ориентацию робота, лидар, камера и ряд других источников данных. Центральная часть транспортной платформы предназначена для установки различной полезной нагрузки. В частности, на рисунке показан робот, оборудованный системой опрыскивания посевов. Для этого на нем установлен бак с активной жидкостью и насосы для системы опрыскивания. Отдельно установлен генератор, использовавшийся для подзарядки робота без смены аккумуляторов. На арке установлены опуски с опрыскивателями, которые обеспечивают точечную обработку каждого растения с возможностью регулирования положения по вертикали и расстояния от форсунки до растения. Вместо системы опрыскивания могут быть установлены модули для сбора проб почвы, транспортировки урожая, десикации кукурузы и другие. Все сенсоры и эффекторы робота объединены в общую сеть и через протокол URIONet связаны с бортовым ЭВМ робота. За обмен данными между роботами на поле отвечает система связи на основе WiFi роутера (в котором предусмотрен LoRaWan передатчик). Структура сенсорной и эффекторной подсистем автономного робота для активной защиты растений показана на рис. 4.

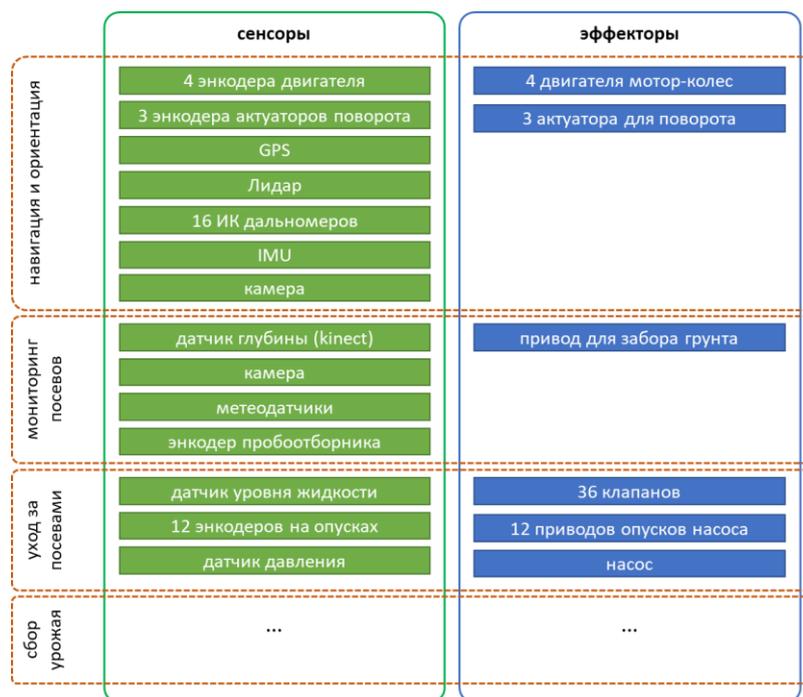


Рис. 4. Структура сенсорной и эффекторной подсистем автономного робота для активной защиты растений (зеленым обозначены сенсоры, синим – эффекторы для различных подсистем автономного робота)

Сенсоры и эффекторы можно разделить на функциональные группы, отвечающие за отдельные функции робота. В частности, для обеспечения перемещения робота в пространстве отвечают 4 независимых мотор-колеса и 3 актуатора поворота. Сенсорная система состоит из энкодеров на двигателях, GPS приёмника, инерционного датчика, лидара и дальномеров для распознавания препятствий вокруг робота. Кроме того, для определения положения робота в пространстве используется веб камера.

Нейрокогнитивная архитектура интеллектуального управления робототехнической системой. В качестве системы управления элементами «умного» поля предполагается применение систем моделирования процесса принятия решений на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. Применение подобной системы позволит обеспечить целенаправленное поведение автономных робототехнических и программных агентов в сложной, частично наблюдаемой и трудно прогнозируемой среде за счет моделирования процесса роста и дегенерации аксодендрональных связей нейронов головного мозга [31]. Данный формализм предполагает использование отдельных независимых агентов-нейронов, взаимодействие которых (за счет обмена информацией и энергией) обеспечивает согласованное целенаправленное поведение всей мультиагентной системы.

При этом стоит учитывать сложность самой робототехнической системы, управление которой обеспечивает мультиагентная нейрокогнитивная архитектура. В частности, необходимо обеспечить совместную работу отдельных автономных мобильных роботов и человека в полевых условиях. При этом у участников робототехнической системы значительно отличаются выполняемые задачи, конструкция, алгоритм работы, вычислительные возможности и доступность связи. На рис. 5 показана схема взаимодействия элементов системы «умного» поля.

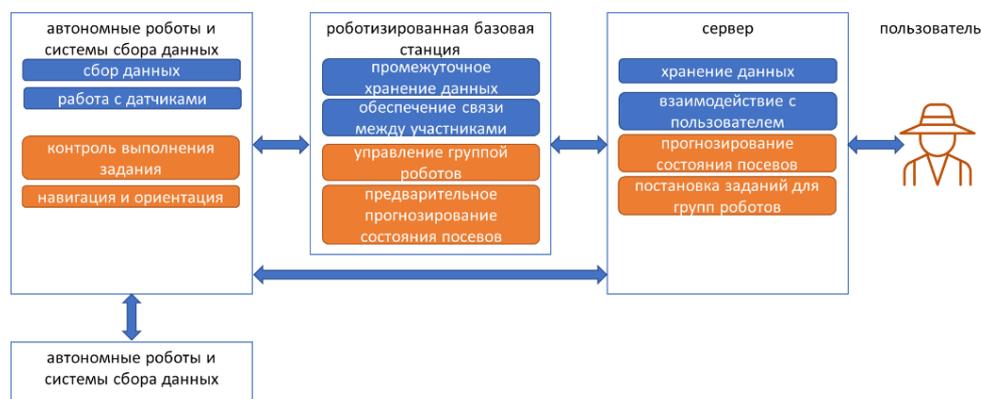


Рис. 5. Схема взаимодействия участников робототехнического коллектива в составе системы «умного» поля

Каждый робот несет на борту вычислительное устройство. Чаще всего программа на нем отвечает, как минимум, за работу с сенсорами и эффекторами робота, сбор данных и передачу информации. Кроме того, на роботе разворачивается программа моделирования нейрокогнитивных мультиагентных архитектур, отвечающая за выполнение поставленной данному роботу миссии, а также за навигацию и перемещение по полю. Система связи позволяет передавать сообщения от интеллектуального агента робота на системы управления других роботов и на роботизированную базовую станцию. Эта станция, в свою очередь, выполняет роль координатора на поле. В частности, программное обеспечение базовой станции отвечает за сбор и промежуточное хранение всех данных с датчиков и обеспечение связи между роботами. Интеллектуальный агент базовой станции отвечает за тактический уровень планирования работ в поле, а в частности, за управление поведением группы роботов (распределение задач и ресурсов, мониторинг состояния роботов, обеспечение безопасности и равномерного распределения исполнителей по полю) и за прогнозирование состояния посевов по полученным данным (на основе чего могут быть внесены изменения в алгоритм работы отдельных роботов или всей системы в целом). Интеллектуальная система управления базовой станцией рассчитана на взаимодействие с внешним сервером, но при этом предполагает возможность самостоятельной работы при длительном отсутствии связи. То есть, база знаний включает в себя не только данные, необходимые для выполнения текущего задания, но и общую информацию об агротехнических операциях для обрабатываемой культуры. Сервер является основой для системы управления «умным» полем и обеспечивает сбор и хранение всех данных с поля, их визуализацию, взаимодействие с пользователями и специалистами. Основной задачей интеллектуальной системы принятия решений является прогнозирование состояния посевов с учетом всех полученных данных (как с сенсоров на поле, так и из внешних источников) и построение наиболее оптимального технологического маршрута ухода за растениями. На основе проведенного анализа интеллектуальная система готовит план действия и формирует задания для группы роботов и специалистов в поле.

Рассмотрим реализацию системы управления автономного мобильного робота в составе «умного» поля (рис. 6). В каждой интеллектуальной системе на основе мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры предусмотрены агенты-сенсоры, выполняющие роль программного «моста» между реальным сенсором и агентами внутри системы принятия решений. При этом в системе предполагается использование отдельных агентов для каждого сенсора на роботе (например, для робота агрозащитника это более 60 датчиков без учета потоков данных с камеры и датчика глубины). Кроме того, общение между роботами в составе «умного» поля реализовано за счет отдельных сенсоров, отвечающих за связь с каждым роботом в системе, в том числе и за связь с базовой станцией и сервером. Такой же подход реализован и на уровне агентов-эффекторов в системе управления

роботом. То есть, автономный робот получает информацию напрямую из своих датчиков и из интеллектуальных агентов других роботов и сервера. На основе полученной информации интеллектуальная система принимает решения и обеспечивает управление роботом. При этом результаты обработки данных в виде сообщений передаются другим роботам, базовой станции и серверу напрямую. Управляющая мультиагентная нейрокognитивная архитектура рекурсивна. Свойство рекурсии проявляется на нескольких уровнях вложенности агентов друг в друга и заключается в том, что характер процессов от уровня к уровню не меняется, сохраняя свое основное содержание поиска субоптимальных планов действий и их использования для синтеза целенаправленного поведения агента (интеллектуальной системой управления роботом) в целом.

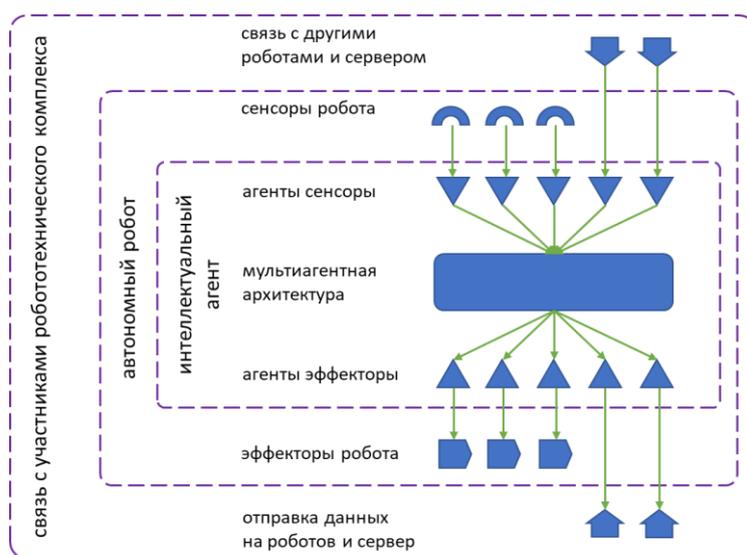


Рис. 6. Структура системы управления автономного мобильного робота, используемого в составе «умного» поля

При этом стоит учитывать, что у некоторых из участников робототехнического коллектива может отсутствовать достаточно производительное вычислительное устройство (например, на борту БПЛА), что не позволит разметить программу для моделирования мультиагентных нейрокognитивных архитектур непосредственно на самом роботе. В этом случае интеллектуальный агент базовой станции берет на себя задачу моделирования поведения данных роботов, а данные с датчиков попадают напрямую на соответствующие агенты-сенсоры в системе принятия решений базовой станции. Распределенный подход позволит обеспечить работоспособность всей системы при равномерной нагрузке на вычислительные устройства и системы связи ее участников. Скриншот визуализации мультиагентной нейрокognитивной архитектуры управления автономным роботом для защиты растений, выполненный в разработанной программе редактирования и визуализации мультиагентных архитектур, показан на рис. 7.

Структура интеллектуального агента базовой станции и сервера принятия решений отличаются лишь тем, что они в основном получают данные от интеллектуальных агентов на борту роботов, но при этом имеют агентов-сенсоров и эффекторов для обеспечения прямого управления каким-либо из роботов (при необходимости). Стоит отметить, что использование мультиагентных нейрокognитивных архитектур позволит разрабатывать универсальные системы управления и упростить масштабирование системы для групп автономных роботов.



Рис. 7. Скриншот мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры управления автономным роботом для защиты растений

Заключение. В работе представлена концепция системы управления группой мобильных роботов в рамках системы «умного» поля на основе моделирования мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. Для обеспечения работы многоагентной гетерогенной группы автономных роботов предлагается использование нейрокогнитивной модели управления с реализацией отдельных интеллектуальных агентов как на каждом отдельном роботе, так и на базовых станциях обслуживания или серверах. При этом, учитывая реализацию рекурсивности в самой архитектуре, задача масштабирования подобной системы управления заметно упрощается. При переходе на более масштабные системы управления, например управление сельскохозяйственной сферой на уровне региона, каждая отдельная система управления выступает в роли «интеллектуального агента» и обменивается сообщениями с агентами, моделирующими сферу сельского хозяйства в целом. При этом принцип организации системы и программная реализация остаются неизменными, то есть агенты разного уровня обмениваются сообщениями и обрабатывают их согласно своим базам знаний. Использование агентов сенсоров и эффекторов для обеспечения обмена знаниями между роботами и центрами принятия решений позволяет минимизировать нагрузку на систему связи и обеспечить запас отказоустойчивости системы управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Lowenberg-DeBoer J., Erickson B.* Setting the record straight on precision agriculture adoption // *Agronomy Journal*. – 2019. – Vol. 111, No. 4. – P. 1552-1569.
2. *Pierce F.J., Nowak P.* Aspects of precision agriculture // *Advances in agronomy*. – 1999. – Vol. 67. – P. 1-85.
3. *Stafford J.V.* Implementing precision agriculture in the 21st century // *Journal of agricultural engineering research*. – 2000. – Vol. 76, No. 3. – P. 267-275.
4. *Marinoudi V. et al.* Robotics and labour in agriculture. A context consideration // *Biosystems Engineering*. – 2019. – Vol. 184. – P. 111-121.
5. *Fountas S. et al.* Agricultural robotics for field operations // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, No. 9. – P. 2672.
6. *Oliveira L.F.P., Moreira A. P., Silva M.F.* Advances in agriculture robotics: A state-of-the-art review and challenges ahead // *Robotics*. – 2021. – Vol. 10, No. 2. – P. 52.
7. *Lytridis C. et al.* An overview of cooperative robotics in agriculture // *Agronomy*. – 2021. – Vol. 11, No. 9. – P. 1109-1818. – <https://doi.org/10.3390/agronomy11091818>.
8. *Yerebakan M.O., Hu B.* Human-Robot Collaboration in Modern Agriculture: A Review of the Current Research Landscape // *Advanced Intelligent Systems*. – 2024. – P. 2300823.
9. *Bechar A., Edan Y.* Human-robot collaboration for improved target recognition of agricultural robots // *Industrial Robot: An International Journal*. – 2003. – Vol. 30, No. 5. – P. 432-436.

10. Tkach I., Bechar A., Edan Y. Switching between collaboration levels in a human–robot target recognition system // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews). – 2011. – Vol. 41, No. 6. – P. 955-967.
11. Berenstein R., Edan Y. Human-robot collaborative site-specific sprayer // Journal of Field Robotics. – 2017. – Vol. 34, No. 8. – P. 1519-1530.
12. Adamides G. et al. HRI usability evaluation of interaction modes for a teleoperated agricultural robotic sprayer // Applied ergonomics. – 2017. – Vol. 62. – P. 237-246.
13. Bergerman M. et al. Robot farmers: Autonomous orchard vehicles help tree fruit production // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2015. – Vol. 22, No. 1. – P. 54-63.
14. Dusadeerungsikul P O., Nof S.Y. A collaborative control protocol for agricultural robot routing with online adaptation // Computers & Industrial Engineering. – 2019. – Vol. 135. – P. 456-466.
15. Seyyedhasani H. et al. Collaboration of human pickers and crop-transporting robots during harvesting–Part I: Model and simulator development // Computers and electronics in agriculture. – 2020. – Vol. 172. – P. 105324.
16. Seyyedhasani H. et al. Collaboration of human pickers and crop-transporting robots during harvesting–Part II: Simulator evaluation and robot-scheduling case-study // Computers and electronics in agriculture. – 2020. – Vol. 172. – P. 105323.
17. Tiotsop L.F., Servetti A., Masala E. An integer linear programming model for efficient scheduling of UGV tasks in precision agriculture under human supervision // Computers & Operations Research. – 2020. – Vol. 114. – P. 104826.
18. Doering D. et al. Design and optimization of a heterogeneous platform for multiple UAV use in precision agriculture applications // IFAC Proceedings Volumes. – 2014. – Vol. 47, No. 3. – P. 12272-12277.
19. del Cerro J. et al. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A survey // Agronomy. – 2021. – Vol. 11, No. 2. – P. 203-215.
20. Albani D. et al. Field coverage for weed mapping: toward experiments with a UAV swarm // Bio-inspired Information and Communication Technologies: 11th EAI International Conference, BICT 2019, Pittsburgh, PA, USA, March 13–14, 2019, Proceedings 11. – Springer International Publishing, 2019. – P. 132-146.
21. Ju C., Son H.I. A distributed swarm control for an agricultural multiple unmanned aerial vehicle system // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. – 2019. – Vol. 233, No. 10. – P. 1298-1308.
22. Ju C., Son H.I. Multiple UAV systems for agricultural applications: Control, implementation, and evaluation // Electronics. – 2018. – Vol. 7, No. 9. – P. 162.
23. Vu Q. et al. Trends in development of UAV-UGV cooperation approaches in precision agriculture // Interactive Collaborative Robotics: Third International Conference, ICR 2018, Leipzig, Germany, September 18–22, 2018, Proceedings 3. – Springer International Publishing, 2018. – P. 213-221.
24. Ni J. et al. An improved real-time path planning method based on dragonfly algorithm for heterogeneous multi-robot system // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 140558-140568.
25. Ju C., Son H.I. Hybrid systems based modeling and control of heterogeneous agricultural robots for field operations // 2019 ASABE Annual International Meeting. – American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2019. – P. 3-15.
26. Potena C. et al. AgriColMap: Aerial-ground collaborative 3D mapping for precision farming // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2019. – Vol. 4, No. 2. – P. 1085-1092.
27. Wang Z., McDonald S.T. Convex relaxation for optimal rendezvous of unmanned aerial and ground vehicles // Aerospace Science and Technology. – 2020. – Vol. 99. – P. 105756.
28. Peterson J. et al. Experiments in unmanned aerial vehicle/unmanned ground vehicle radiation search // Journal of Field Robotics. – 2019. – Vol. 36, No. 4. – P. 818-845.
29. Нагоев З.В., Шуганов В.М., Заммоев А.У., Бжихатлов К.Ч., Иванов З.З. Разработка интеллектуальной интегрированной системы «Умное поле» // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1. – С. 81-91. – DOI: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-1-81-91>.
30. Bzhikhatlov K., Pshenokova I. Intelligent Spraying System of Autonomous Mobile Agricultural Robot // International Conference on Agriculture Digitalization and Organic Production. – Singapore : Springer Nature Singapore, 2023. – P. 269-278. – https://doi.org/10.1007/978-981-99-4165-0_25.
31. Нагоев З.В. Интеллектика, или Мышление в живых и искусственных системах. – Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2013. – 211 с.

REFERENCES

1. Lowenberg-DeBoer J., Erickson B. Setting the record straight on precision agriculture adoption, *Agronomy Journal*, 2019, Vol. 111, No. 4, pp. 1552-1569.
2. Pierce F.J., Nowak P. Aspects of precision agriculture, *Advances in agronomy*, 1999, Vol. 67, pp. 1-85.
3. Stafford J.V. Implementing precision agriculture in the 21st century, *Journal of agricultural engineering research*, 2000, Vol. 76, No. 3, pp. 267-275.
4. Marinoudi V. et al. Robotics and labour in agriculture. A context consideration, *Biosystems Engineering*, 2019, Vol. 184, pp. 111-121.
5. Fountas S. et al. Agricultural robotics for field operations, *Sensors*, 2020, Vol. 20, No. 9, pp. 2672.
6. Oliveira L.F.P., Moreira A. P., Silva M.F. Advances in agriculture robotics: A state-of-the-art review and challenges ahead, *Robotics*, 2021, Vol. 10, No. 2, pp. 52.
7. Lytridis C. et al. An overview of cooperative robotics in agriculture, *Agronomy*, 2021, Vol. 11, No. 9, pp. 1109-1818. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy11091818>.
8. Yerebakan M.O., Hu B. Human–Robot Collaboration in Modern Agriculture: A Review of the Current Research Landscape, *Advanced Intelligent Systems*, 2024, pp. 2300823.
9. Bechar A., Edan Y. Human-robot collaboration for improved target recognition of agricultural robots, *Industrial Robot: An International Journal*, 2003, Vol. 30, No. 5, pp. 432-436.
10. Tkach I., Bechar A., Edan Y. Switching between collaboration levels in a human–robot target recognition system, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2011, Vol. 41, No. 6, pp. 955-967.
11. Berenstein R., Edan Y. Human-robot collaborative site-specific sprayer, *Journal of Field Robotics*, 2017, Vol. 34, No. 8, pp. 1519-1530.
12. Adamides G. et al. HRI usability evaluation of interaction modes for a teleoperated agricultural robotic sprayer, *Applied ergonomics*, 2017, Vol. 62, pp. 237-246.
13. Bergerman M. et al. Robot farmers: Autonomous orchard vehicles help tree fruit production, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2015, Vol. 22, No. 1, pp. 54-63.
14. Dusadeerungsikul P O., Nof S.Y. A collaborative control protocol for agricultural robot routing with online adaptation, *Computers & Industrial Engineering*, 2019, Vol. 135, pp. 456-466.
15. Seyyedhasani H. et al. Collaboration of human pickers and crop-transporting robots during harvesting—Part I: Model and simulator development, *Computers and electronics in agriculture*, 2020, Vol. 172, pp. 105324.
16. Seyyedhasani H. et al. Collaboration of human pickers and crop-transporting robots during harvesting—Part II: Simulator evaluation and robot-scheduling case-study, *Computers and electronics in agriculture*, 2020, Vol. 172, pp. 105323.
17. Tsiotsop L.F., Servetti A., Masala E. An integer linear programming model for efficient scheduling of UGV tasks in precision agriculture under human supervision, *Computers & Operations Research*, 2020, Vol. 114, pp. 104826.
18. Doering D. et al. Design and optimization of a heterogeneous platform for multiple UAV use in precision agriculture applications, *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, Vol. 47, No. 3, pp. 12272-12277.
19. del Cerro J. et al. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A survey, *Agronomy*, 2021, Vol. 11, No. 2, pp. 203-215.
20. Albani D. et al. Field coverage for weed mapping: toward experiments with a UAV swarm, *Bio-inspired Information and Communication Technologies: 11th EAI International Conference, BICT 2019, Pittsburgh, PA, USA, March 13–14, 2019, Proceedings 11*. Springer International Publishing, 2019, pp. 132-146.
21. Ju C., Son H.I. A distributed swarm control for an agricultural multiple unmanned aerial vehicle system, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2019, Vol. 233, No. 10, pp. 1298-1308.
22. Ju C., Son H.I. Multiple UAV systems for agricultural applications: Control, implementation, and evaluation, *Electronics*, 2018, Vol. 7, No. 9, pp. 162.
23. Vu Q. et al. Trends in development of UAV-UGV cooperation approaches in precision agriculture, *Interactive Collaborative Robotics: Third International Conference, ICR 2018, Leipzig, Germany, September 18–22, 2018, Proceedings 3*. Springer International Publishing, 2018, pp. 213-221.
24. Ni J. et al. An improved real-time path planning method based on dragonfly algorithm for heterogeneous multi-robot system, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 140558-140568.
25. Ju C., Son H.I. Hybrid systems based modeling and control of heterogeneous agricultural robots for field operations, *2019 ASABE Annual International Meeting*. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2019, pp. 3-15.
26. Potena C. et al. AgriColMap: Aerial-ground collaborative 3D mapping for precision farming, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, Vol. 4, No. 2, pp. 1085-1092.

27. Wang Z., McDonald S.T. Convex relaxation for optimal rendezvous of unmanned aerial and ground vehicles, *Aerospace Science and Technology*, 2020, Vol. 99, pp. 105756.
28. Peterson J. et al. Experiments in unmanned aerial vehicle/unmanned ground vehicle radiation search, *Journal of Field Robotics*, 2019, Vol. 36, No. 4, pp. 818-845.
29. Нагоев З.В., Шуганов В.М., Заммоев А.У., Бжихатлов К.Ч., Иванов З.З. Разработка интеллектуальной интегрированной системы «Умное поле» [Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1. – С. 81-91. – DOI: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-1-81-91>.
30. Bzhikhatlov K., Pshenokova I. Intelligent Spraying System of Autonomous Mobile Agricultural Robot, *International Conference on Agriculture Digitalization and Organic Production*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 269-278. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-99-4165-0_25.
31. Nagoev Z.V. Intellectika, ili Myshlenie v zhivyykh i iskusstvennykh sistemakh [Intelligence, or thinking in living and artificial systems]. Nal'chik: Izd-vo KBNTS RAN, 2013, 211 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Х. Пшихопов.

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 Аuesовна – 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».

Макоев Астемир Русланбекович – Научно-образовательный центр Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук; e-mail: astera@mail.ru; г. Нальчик, Россия; аспирант.

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 «Intelligent Habitats».

Makoev Astemir Ruslanbekovich – Scientific and Educational Center of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: astera@mail.ru; Nalchik, Russia; post-graduate student.

УДК 621.396

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-18-32

С.Г. Емельянов, С.Н. Фролов, Е.А. Титенко, Д.П. Тетерин, А.П. Локтионов

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКОНФИГУРАЦИИ ГРУППИРОВКИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Целью исследования является автоматизация управления группировкой малых космических аппаратов (наноспутников) в условиях ее переменной численности за счет актуализации ее состояния на основе рассылки и обработки широковещательных запросов между аппаратами и применения нейронной сети Transformer для составления прогнозов состояния сети космических аппаратов. Исследуется задача обеспечения связности сети наноспутников, которая сводится к реализации адаптивного управления сетью с оценкой и прогнозированием состояния каналов связи между парами аппаратов на основе нейронной сети. Разработаны динамическая реконфигурация и машинное обучение сети аппаратов. Определены алгоритмические средства для первичного обучения нейронной сети и ее последующего дообучения с учетом предобработки исходных разреженных или полностью связанных наборов данных о сети аппаратов. По завершении обучения на синтетических данных созданная нейронная сеть способна прогнозировать качество связи с учетом прямой видимости, ослабления сигнала в зависимости от расстояния и состояния аппаратной платформы наноспутника. Разработанная программная система выполняет детерминиро-

ванную реконфигурацию по текущему состоянию сети наноспутников и адаптивную реконфигурацию по историческим данным анализом нейронной сетью Transformer скрытых закономерностей функционирования наноспутников. Для прогнозирования качества связи применен функционал связи геодезических координат пар наноспутников и векторов их состояний с элементами матрицы качества связи между наноспутниками с заданными начальным моментом времени, величиной временного интервала, величиной шага дискретизации измерительного процесса. Применение аппарата нейронных сетей, реализуемых на GPU, позволило прогнозировать возможные состояния наноспутников и досрочно проводить реконфигурацию группировки, в том числе удалять «проблемные» аппараты из состава группировки.

Сеть малых космических аппаратов; многоагентная система; архитектура нейронной сети; реконфигурация системы; прогноз состояния.

S.G. Emelyanov, S.N. Frolov, E.A. Titenko, D.P. Teterin, A.P. Loktionov

HARDWARE AND SOFTWARE MEANS FOR DYNAMIC RECONFIGURATION OF A GROUP OF SMALL SPACE VEHICLES

The goal of the study is to automate the control of a group of nanosatellites in conditions of its variable number by updating its state based on sending and processing broadcast requests between nanosatellites and using the Transformer neural network. A neural network is needed to make predictions about the state of the spacecraft network. The problem of ensuring connectivity of a network of nanosatellites is studied, which comes down to the implementation of adaptive network control with assessment and prediction of the state of communication channels between pairs of devices based on a neural network. Dynamic reconfiguration and machine learning of a network of devices have been developed. Algorithmic tools have been defined for the initial training of a neural network and its subsequent additional training, taking into account the preprocessing of the original sparse or fully connected data sets about the network of devices. Upon completion of training on synthetic data, the created neural network is able to predict the quality of communication, taking into account line of sight, signal attenuation depending on distance and the state of the nanosatellite hardware platform. The developed software system performs deterministic reconfiguration based on the current state of the nanosatellite network and adaptive reconfiguration based on historical data by analyzing the hidden patterns of nanosatellite functioning using the Transformer neural network. To predict the quality of communication, a functional is used to connect the geodetic coordinates of pairs of satellites and the vectors of their states with the elements of the matrix of the quality of communication between nanosatellites with a given initial time, the value of the time interval, and the value of the sampling step of the measurement process. The use of neural networks implemented on GPUs made it possible to predict possible states of nanosatellites and carry out reconfiguration of the constellation ahead of schedule, including removing “problematic” nanosatellites from the network.

Network of small spacecraft; multi-agent system; neural network architecture; system reconfiguration; condition forecast.

Введение. Перспективным направлением развития малой космонавтики является создание интеллектуальных российских низкоорбитальных группировок, способных коллективно выполнять различные задачи сбора, мониторинга, зондирования территорий и объектов Земли и космоса, проведения космических экспериментов по измерению магнитного поля Земли их магнитных аномалий, исследованию верхних слоев ионосферы и др. [1–3]. Параллельные вычислительные процессы анализа взаимного положения космических аппаратов и их функциональной готовности являются определяющими в оценке работоспособности группировки в условиях неопределённости внутренней и внешней сред.

Малые космические аппараты (МКА) формата CubeSat 3U, 6U имеют выгодные технико-экономические характеристики для вывода на орбиту полезной нагрузки за счет достаточно короткого срока их изготовления, возможности автоматического запуска пусковыми контейнерами или доставки на орбиту как попутный груз. Миниатюризация электронной компонентной базы, уменьшение потребления электроэнергии измерительными, видео-модулями и их размеров, расширение их тактико-технических характеристик, а также совершенствование самой конструкции МКА (наноспутников) привели к появлению на орбите (400-500 км) сотен МКА, эффективно работающих по отдельности

в соответствии с полетным заданием. Дальнейшее повышение эффективности эксплуатации МКА связывается с разработкой теоретических и аппаратно-программных средств объединения аппаратов в группировке (сети) и скоординированного (управляемого) решения прикладных, исследовательских и ряда фундаментальных задач силами нескольких аппаратов. В первую очередь речь идет о скоординированном выполнении вычислительно-коммуникационных задач приема, передачи, трансляции служебных данных и данных полезной нагрузки между наноспутниками без временных потерь.

Основная проблема заключается в отсутствии методов и средств управления сетью взаимодействующих аппаратов. Централизованные методы в силу особенностей предельной области (высокая интенсивность обмена данным между МКА, значительная задержка подачи команд с Земли, воздействие помех) не могут обеспечить оперативное управление группировкой МКА. Соответственно однажды образованная сеть МКА нуждается в методах, алгоритмах и аппаратно-программных средствах актуализации, динамической реконфигурации сети МКА [4].

Информационно-технической основой создания группировки взаимодействующих аппаратов (сети МКА) является самоорганизующаяся mesh-сеть [5], которая естественным образом упорядочивает процессы динамической («горячей») реконфигурации за счет программно-управляемого поддержания распределенной информационной структуры о соединениях между элементами сети и реализуемых широковещательных рассылок оповещений (служебных «маяков»), позволяющих получить, актуализировать информацию о соединениях между МКА и вести реконфигурацию в фоновом режиме по отношению к основной работе сети МКА. Организация широковещательных рассылок и составление маршрутов между МКА являются основой для вычислительных процессов создания, актуализации, реконфигурации сети МКА на основе распределенной карты сети [6,7]. На основе сетевой модели разрабатываются самоорганизующиеся распределенные системы управления группировкой интеллектуальных агентов многоагентной системы, основанные на принципах самоорганизации и методах искусственного интеллекта (ИИ) [8–14]. В последние годы выявлена эффективность адаптивной реконфигурации многоагентных систем, в том числе сети МКА [16, 17].

Опираясь на отмеченные результаты последних лет необходимо продолжить исследование адаптивной динамической реконфигурации многоагентной системы МКА на основе накопления данных, глубокого машинного обучения. Целью работы является автоматизация управления группировкой МКА как многоагентной системы в условиях переменной численности группировки, актуализацией состояния группировки рассылкой и обработкой широковещательных запросов между аппаратами, динамической реконфигурацией системы МКА, машинным обучением и составлением прогнозов состояния группировки нейронной сетью. Таким образом, актуальность исследования определяется созданием аппаратно-программных средств динамической реконфигурации и машинного обучения группировки МКА.

Децентрализованное управление группировкой МКА. В исследовании рассматривается и развивается децентрализованный принцип управления группировкой МКА как многоагентной системой. В этом контексте каждый МКА рассматривается как интеллектуальный агент многоагентной системы, имеющий локальную и глобальную цели управления. Локальная цель управления агентом связана с обособленной работой МКА в соответствии с полетным заданием. Глобальная цель управления агентом едина для всех агентов, она соотносится с поддержкой актуализированного состояния сети работоспособных МКА.

В соответствии с мультиагентным подходом [15] агенты (МКА) могут активироваться:

- ◆ по установленному времени;
- ◆ по наступлению целевого события (приближение космической станции, появление в зоне видимости системных или целевых объектов);
- ◆ по достижению заложенного порогового значения параметра состояния агента (предельный уровень заряда аккумулятора, максимальное расстояние между наноспутниками, критическое значение радиации, фиксированная плотность вакуума и др.).

В периоды времени, свободные от передачи данных на наземный пункт, МКА-агенты находятся в режиме взаимодействия. Без дополнительных команд с Земли МКА как агенты выполняют системную функцию обмена своей телеметрической информацией (ТМИ), в том числе о текущем состоянии. Эта информация служит базой для описания текущей конфигурации и для реконфигурации сети, т.е. директивного внесения изменений в соответствии с главной целевой функцией – поддержанием связности и обеспечением живучести сети в условиях динамического выхода МКА из сети или входа в сеть.

Первый подход к управлению конфигурацией сети создание циклического процесса распространения-получения между «возбужденными» элементами сети информации (кортежей) о своем состоянии, обработки массивов кортежей на предмет связности сети и последующей актуализации структуры сети МКА. Принципы самоорганизации заключаются в создании и использовании алгоритмами реконфигурации распределённой структуры данных – матрицы сети, описывающей текущее состояние сети.

Таким образом, группировка МКА как многоагентная система с децентрализованным принципом управления способна к автоматической организации при условии контроля каждым агентом значений собственных параметров и выполнении ряда общесистемных действий (поиск агентом соседа, оценка качества канала связи этой пары МКА, назначение или исключение адреса пары агентов в сети, передача служебных данных – «маяков»).

Второй подход децентрализованного управления сетью МКА заключается в применении методов и технологии ИИ для прогнозирования состояния сети МКА по историческим (ретроспективным) данным состояния самих МКА на основе нейронных сетей (НС). Задача на адаптивную реконфигурацию сети МКА решается на основе накопления данных, глубокого машинного обучения и выявления закономерностей из временных рядов состояний пар МКА, в частности, их состояний и координат.

Контроль связности сети МКА. Для планирования связности сети каждый МКА в составе группировки может опираться на фактические данные о себе в предыдущие моменты времени: периоды наличия/отсутствия связи с другими аппаратами, качество связи, расстояния от других аппаратов. В такой постановке задача обеспечения связности сети МКА сводится к реализации адаптивного управления сетью с оценкой и прогнозированием состояния каналов связи между парами аппаратов на основе НС.

Наиболее подходящей архитектурой НС для этого является архитектура НС Transformer. Главное конкурентное преимущество нейронной сети Transformer – наличие встроенного механизма «внутреннего внимания», имитирующая когнитивную способность человека фокусироваться на определенных особенностях входных данных для принятия решения, что позволяет выделять из анализируемых временных рядов состояний МКА скрытые закономерности на ранних стадиях их формирования (рис. 1).

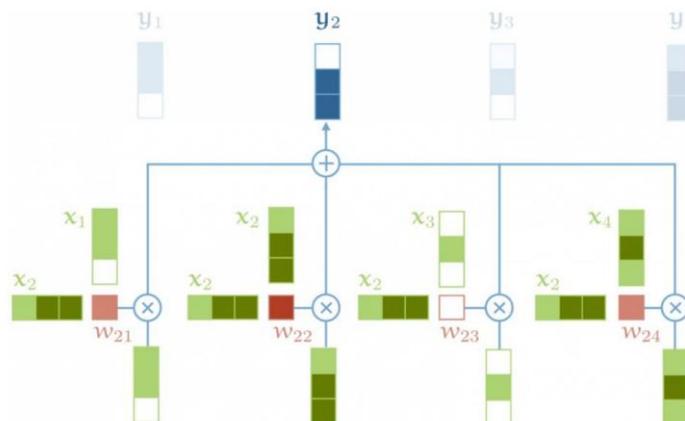


Рис. 1. Общая архитектура нейронной сети

НС Transformer позволяет эффективно обрабатывать временные ряды, последовательности данных о МКА с множеством разнородных признаков. Традиционно алгоритмы на основе Transformer широко заменяют RNN в обработке сообщений естественного языка и, в частности, в предсказании вариантов предложений на основе предыдущего контекста. Данное свойство предсказания НС Transformer является аналогом прогнозирования качества каналов связи, поскольку существуют совпадающие по форме зависимости монотонного характера между анализируемыми элементами временных рядов для МКА и информационными единицами текста, в частности, между текущим предложением и предыдущим контекстом.

Поддержка сети МКА (алгоритмическая и адаптивная реконфигурации) основана на выполнении следующих базовых функций и реализующих их алгоритмов:

- ◆ образование сети МКА;
- ◆ реконфигурация сети МКА (пополнение, удаление МКА);
- ◆ динамическая маршрутизация;
- ◆ сбор и сохранение фактических данных о состоянии сети и качестве связи между парами МКА;
- ◆ подготовка синтетических данных состояния сети МКА;
- ◆ предобработка данных о состоянии сети и обучение/дообучение НС Transformer;
- ◆ прогнозирование наличия и качества связи между парами МКА сети.

Программная система децентрализованного управления группировкой МКА (ПСДУ) предназначена для создания и поддержания в работоспособном состоянии mesh-сети обмена данными между МКА в составе группировки и между МКА и наземными средствами поддержки их эксплуатации. В составе ПСДУ выделяются следующие программные части:

- ◆ космическая (орбитальная) часть децентрализованного управления группировкой МКА;
- ◆ наземная часть децентрализованного управления группировкой МКА (на основе НС Transformer).

Каждая из частей ПС имеет модульную структуру, каждый модуль содержит диспетчер и выполняемые программные модули с заданными структурами данных, вычислительными, обменными операциями и др. Структура ПС показана на рис. 2. Данная схема содержит общее программное обеспечение, в котором будут функционировать ПС, средства (среда) разработки и собственно две программные части, отвечающие за логику выполнения базовых функции.

В составе космической (орбитальной) части ПС выделяются рабочие модули первичного уровня детализации:

- ◆ модуль сбора и сохранения данных о состоянии МКА, в том числе по оценке работоспособности подсистем;
- ◆ модуль управления МКА;
- ◆ модуль управления радиосвязью, обеспечивающий широковещательную, адресную рассылку сообщений между аппаратами сети для образования и поддержания сети;
- ◆ модуль управления картами сети, реализующий поддержание распределенной структуры сети за счет формирования и обновления матриц расстояний и качества связи;
- ◆ модуль построения списка маршрутов сети и их анализа.

В составе наземной части ПС выделяются рабочие модули первичного уровня детализации:

- ◆ модуль приема-передачи конфигурации сети, отвечающий за получение, предобработку и накопление данных о фактическом состоянии сети;
- ◆ модуль подготовки синтетических данных состояния сети МКА;
- ◆ модуль обучения НС Transformer ретроспективных и синтетических данных, реализующий механизм «акцентирования внимания» позволяющий устанавливать зависимости между элементами последовательностей или временных рядов на больших рас-

стояниях, что делает такие нейронные сети более эффективными для обработки длинных последовательностей (реализация на видеоплате с поддержкой технологии программирования GPU);

- ◆ модуль формирование прогнозов и подготовки плана реконфигурации.

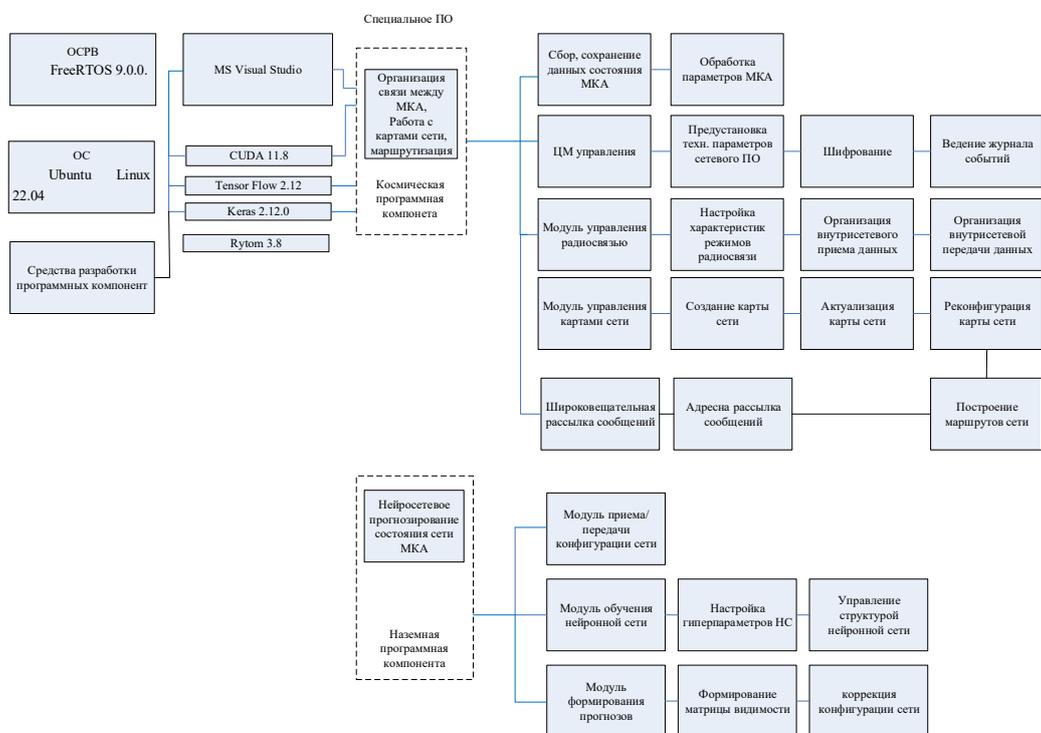


Рис. 2. Структура программной системы децентрализованного управления группировкой МКА

Главное преимущество распределенного программного приложения с децентрализованным принципом управления заключается в возможности одновременно выполнять отдельные рабочие модули на разных территориально распределенных МКА с синхронизацией процессов.

Основная нагрузка в составе сетевого ПО в части децентрализованного управления сетью связана с взаимодействием центрального модуля управления ПО и модулем управления радиосвязью, поэтому эти модули связаны входами и выходами с остальными модулями и областями памяти для хранения массивов расстояний, массивов качества связи и других системных переменных.

Общая схема взаимодействия модулей с учетом выделения логико-вычислительных блоков, блоков взаимодействия (настройки режимов, передачи ID МКА, установка предельных размеров и граничных значений и др.), отдельных блоков анализа и составление прогнозов и подготовки управляющей информации на реконфигурацию сети показана на рис. 3.

Данная схема (рис. 3) конкретизирует внутреннюю логику работы ПС, в которой выделяются следующие фазы управления сетью МКА:

- ◆ фаза 1: создание, актуализация сети на основе базовых процессов и типовых событий;
- ◆ фаза 2: анализ конфигурации сети и ее децентрализованное изменение;
- ◆ фаза 3 адаптивной реконфигурации.

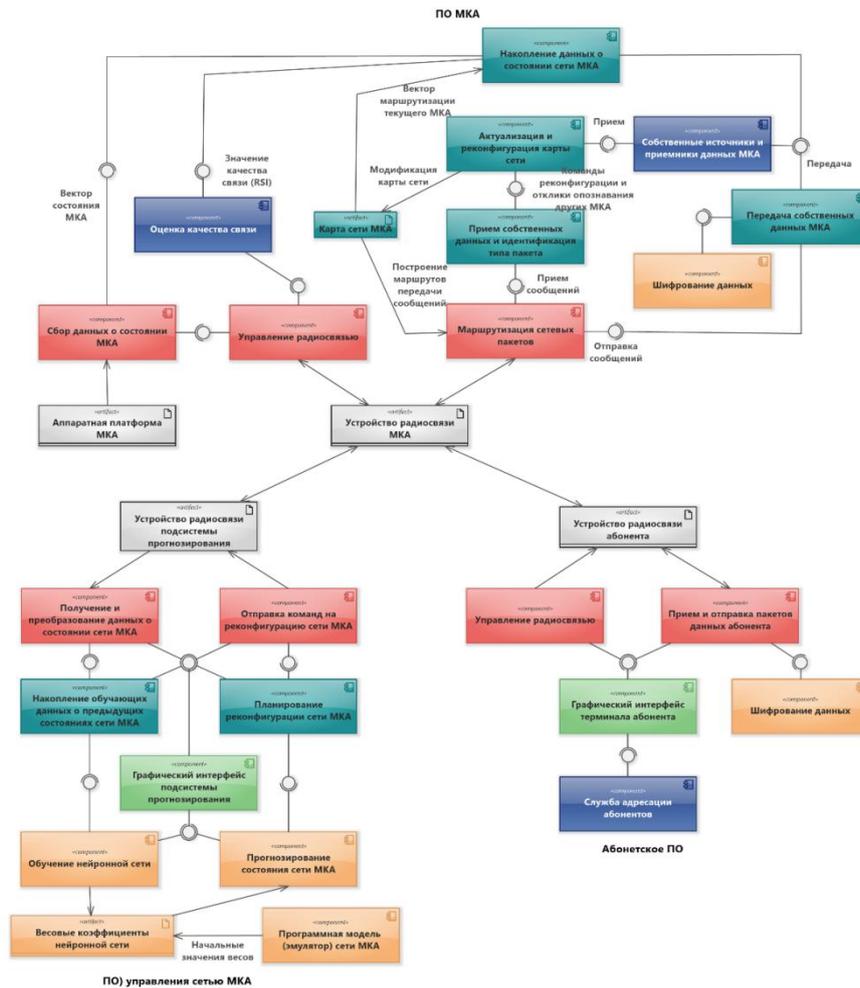


Рис. 3. Общая схема взаимодействия модулей ПС

Фаза 1 начинается с плановой подготовки будущей сети с помощью модуля сервисного обслуживания и базы данных параметров МКА (ID, формы и режимы передачи данных, форматы маршрутов и др.) использует созданную систему команд для управления функциональными узлами и блоками в составе центрального модуля управления, модуля управления радиосвязью. Она заключается в систематической рассылке, получении ответов и накоплении значений между парами МКА по расстояния и качеству сигнала.

Отдельной стороной идет получение собственно ТМИ каждым аппаратом и ее сохранения в dmp памяти настроек. В дальнейшем ТМИ наряду с двухстрочной формой координат TLE будет использована для обучения сети, составления прогноза и подготовки управляющей информации на адаптивную реконфигурацию.

Фаза 2 реализует распределенное внесение изменений в конфигурацию сети МКА на основе имеющихся экземпляров карты сети. Ее результатом является обновленная карта сети МКА в соответствии с текущими состояниями МКА и их пространственным положением на орбите. Алгоритмическая основа - цикл широковещательных рассылок «коротких» служебных сообщений радио модулями LoraMesh. Прием, локальная обработка таких сообщений позволяют в установленные моменты времени проводить алгоритмическую реконфигурацию группировки по фактическому состоянию МКА или их взаимному положению на орбите.

Фаза 3 связана с работой наземной части ПС на базе НС Transformer. Начальное обучение выполняется по синтетическим данным, построенным по аналогии с протоколированием соединений спутниковой низкоорбитальной группировки. Для выполнения дообучения уже используются кадры сети МКА, со значением расстояний и уровня качества сети и состояний самих аппаратов. Прогнозирование заключается в анализе ретроспективных данных, выявлению потенциальных проблем с падением уровня сигнала между парами МКА, ухудшению состояния отдельного МКА в паре. Эти данные НС проверяются на выявление глобального тренда потери соединения в будущем.

Выполнена модификация архитектуры НС Transformer в виде дополнения блоки сети, отвечающих за реализацию множественных межслойных связей, пятью слоями с остаточными связями (Residual Layers), выступающими в роли энкодера признаков входных данных.

Конфигурация аппаратной платформы для обеспечения обучения/прогнозирования с помощью нейронной сети:

- ◆ Intel Core i7 – 4790, 8 x 3,60 ГГц;
- ◆ 32 Гб RAM DDR3-1600 МГц;
- ◆ 1 x NVIDIA GeForce RTX 4090 24Гб GDDR6X;
- ◆ SSD-накопитель Samsung 860 QVO 1024 Гб.

В качестве программной платформы для моделирования работы НС использованы библиотеки CUDA 11.8, CUDNN 8.5, GDAL 3.1, TensorFlow 2.8.0, Keras 2.10.0, osgEarth 2.8 [18–22].

Результаты и обсуждение. Наиболее значимой для поддержания связности сети является адаптивная реконфигурация сети МКА на основе составления прогнозных значений качества соединений между парами МКА в сети. Адаптивная реконфигурация реализуется алгоритмами обучения и прогнозирования.

Задача прогнозирования заключается в формировании матрицы качества связи $\mathbf{Q}(t_+)$ на основе рассчитанной матрицы прямой видимости $\mathbf{D}(t_+)$ и текущего множества векторов состояний МКА $\{\mathbf{v}_i(t)\}$ с помощью функционала прогнозирования $F_{Q_+}(\cdot)$. Кроме того, данный функционал в качестве параметра также принимает матрицу весовых коэффициентов $\mathbf{W}(t_-)$, которая формируется с помощью функционала обучения $F_{Q_+}(\cdot)$ на основе фактических данных о пространственных координатах МКА $\{p_i(t_-)\}$, множестве векторов состояний МКА $\{\mathbf{v}_i(t_-)\}$ и матрице качества связи $\mathbf{Q}(t_-)$. Здесь нижний индекс переменных имеет следующую интерпретацию:

- ◆ «+» – значение в текущий момент времени;
- ◆ «-» – значение в предыдущий момент времени.

Метод применения НС для прогнозирования возможных состояний сети малых космических аппаратов должен реализовать функционалы обучения $F_{Q_+}(\cdot)$ и прогнозирования $F_{Q_+}(\cdot)$ и, соответственно, разделен на две части:

1. Сбор фактических данных о состоянии сети МКА и обучение или дообучение НС с вычислением весовых коэффициентов в матрице $\mathbf{W}(t_-)$.
2. Расчет матрицы прямой видимости МКА $\mathbf{D}(t_+)$ и прогнозирование матрицы качества связи $\mathbf{Q}(t_+)$ в заданном интервале времени.

Для реализации функционалы обучения $F_{Q_+}(\cdot)$ необходимо получить следующие данные о состоянии сети в целом и каждого МКА в частности:

- ◆ трехмерные геодезические координаты $p_i(t_-)$ МКА, которые вычисляются на основе их текущих TLE параметров;

- ♦ векторы состояния МКА $\mathbf{V}_i(t_-)$, формируемые встроенными средствами диагностики аппаратной платформы;

- ♦ матрицы фактического качества связи $\mathbf{Q}(t_-)$, которые создаются на основе отправки тестовых сигналов и регистрации времени их получения.

Все данные для обучения являются хронологическими (временными) рядами, причем каждый из компонентов имеет собственный интервал обновления (рис. 4): $p_i(t_-)$ – 1-5 сек, $\mathbf{Q}(t_-)$ – 5-20 сек, $\mathbf{V}_i(t_-)$ – 5-10 мин.

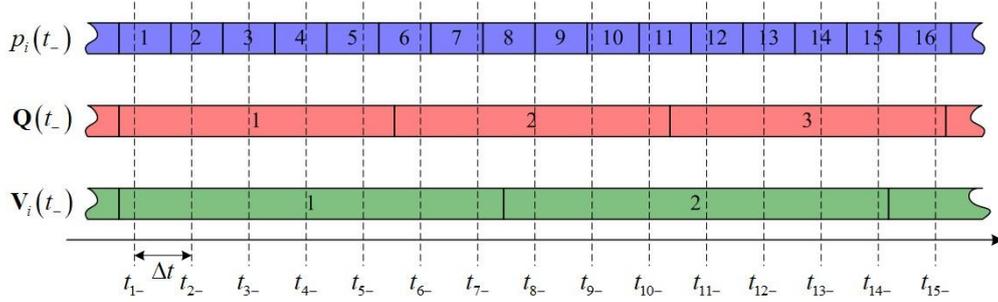


Рис. 4. Хронологические ряды данных о состоянии МКА и сети

Выявлено, что наилучший вариант применения НС для прогнозирования качества связи описывается отображением

$$\langle\langle p_i(t_+), \mathbf{V}_i(t_+), p_j(t_+), \mathbf{V}_j(t_+) \rangle\rangle \longrightarrow q_{ij}(t_+), \quad (1)$$

которое связывает пространственные геодезические координаты пары МКА $p_i(t_+)$ и векторов их состояний $\mathbf{V}_i(t_+)$ с качеством связи между ними $q_{ij}(t_+)$ [16]. Следует отметить, что отображение (1) некоммутативно, поскольку $q_{ij}(t_+) \neq q_{ji}(t_+)$, хотя, без сомнений, значения должны быть близки. В рамках модели сети МКА также отмечена временная коррелированность всех указанных выше значений, что позволяет обобщить отображение (1) на заданный начальным моментом t_{0+} временной интервал с шагом Δt длиной N_i :

$$\langle\langle p_i, \mathbf{V}_i, p_j, \mathbf{V}_j \rangle\rangle_{\tau} \longrightarrow \langle\langle q_{ij} \rangle\rangle_{\tau}, \tau = t_{0+} + m \cdot \Delta t, m = \overline{1, N_i}, \quad (2)$$

где τ – дискретное время, используемое для обучения ИНС и прогнозирования:

$$\tau = t_{0+} + m \cdot \Delta t, m = \overline{1, N_i}, i = \overline{1, N_{MKA}(\tau)}, j = \overline{1, N_{MKA}(\tau)}. \quad (3)$$

Функционал обучения $F_{Ql}(\cdot)$ заключается в итеративном применении функции корректировки весов на основе предъявляемых на вход сети хронологических последовательностей данных о положении и состоянии МКА и соответствующих им данных о качестве связи:

$$\mathbf{W}_n = f_{Ql}(\langle\langle p_i, \mathbf{V}_i, p_j, \mathbf{V}_j, q_{ij} \rangle\rangle_{\tau}, \mathbf{W}_{n-1}), \quad (2)$$

Реализация функции f_{Ql} (2) корректировки весов и принципы группировки подаваемых на вход данных зависят от выбранной архитектуры ИНС.

Обобщенный алгоритм обучения на базе нейронной сети Transformer включает следующие этапы:

1. Начальное обучение нейронной сети Transformer на основе синтетических и реальных данных.

2. Основной цикл работы сети включающий параллельные операции по управлению сетью МКА и сбору фактических данных о ее функционировании с периодическим дообучением.

Начальное обучение нейронной сети является двухэтапным и включает:

- ◆ обучение на синтетических данных имитационной модели;
- ◆ обучение на фактических данных сети МКА при отключенном прогнозировании.

Для создания синтетических данных применяется имитационная модель сети из 100-150 МКА со случайным равномерным распределением начальных геодезических координат орбит и нормальным распределением высоты в диапазоне 300-600 км. Состояние аппаратной платформы генерируется по равномерному закону распределения в диапазоне [0..1]. Интервал сохранения данных составляет 12 измерений в минуту ($\Delta t = 5$ сек) при хронологической длине кадра сети N_t равной 500 элементов, что соответствует 35 кадрам сети в сутки.

Каждый кадр создается разреженным или полносвязанным. В качестве показателя качества связи используется уровень мощности принимаемого (входящего) сигнала – Received Signal Strength Indicator (RSSI), измеряемый в диапазоне 0 ... -120 дБм. Пороговое значение, соответствующее наличию связи между парами МКА, составляет -85 дБм. RSSI является неотъемлемой частью физического уровня передачи данных и не требует дополнительных затрат пропускной способности на периодическую оценку (не менее 1 раза в 5 сек).

Структура кадра обучения имеет вид (рис. 5).

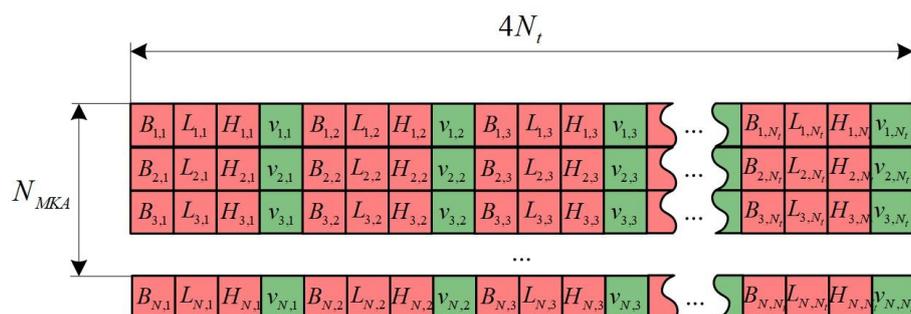


Рис. 5. Формат части кадра сети МКА для обучения

Единицей входных данных как при обучении, так и при прогнозировании является кортеж значений ij -ых пар МКА

$$\left\langle \left\langle p_i(t), \mathbf{V}_i(t) \right\rangle \times \left\langle p_j(t), \mathbf{V}_j(t) \right\rangle \right\rangle_{t=1}^{500}$$

из 4000 элементов, который формируется чередованием элементов i -й и j -й строк части кадра состояния сети (рис. 6).

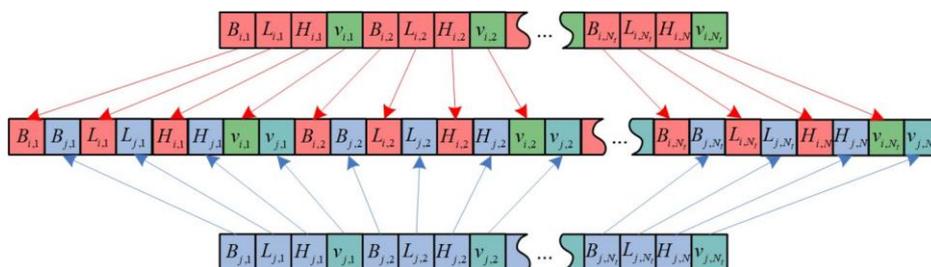


Рис. 6. Формирование исходных данных для обучения и прогнозирования

Объединение одноименных параметров МКА упрощает поиск взаимосвязанных данных при обучении нейронной сети. Расчеты на эмуляторе НС показали, что средне-квадратическая ошибка прогнозирования снижается с 30-40 до 12-15 дБм (в 1,5-2 раза). Графики обучения нейронной сети на разреженных и полностью связанных синтетических кадрах сети МКА показаны на рис. 7 и 8.

По завершении обучения на синтетических данных созданная НС способна прогнозировать качество связи с учетом прямой видимости, ослабления сигнала в зависимости от расстояния и состояния аппаратной плат-формы МКА. При этом вариант НС на полностью связанных кадрах состояния сети МКА дает результат с трехкратно меньшим значением ошибки прогнозирования в отношении установленного порога в 15дБм. Полностью связанные кадры сети МКА при обучении обладают большей информативностью и позволяют сократить минимальный интервал обучающей выборки с 1 недели до одного дня при равном количестве МКА в сети.

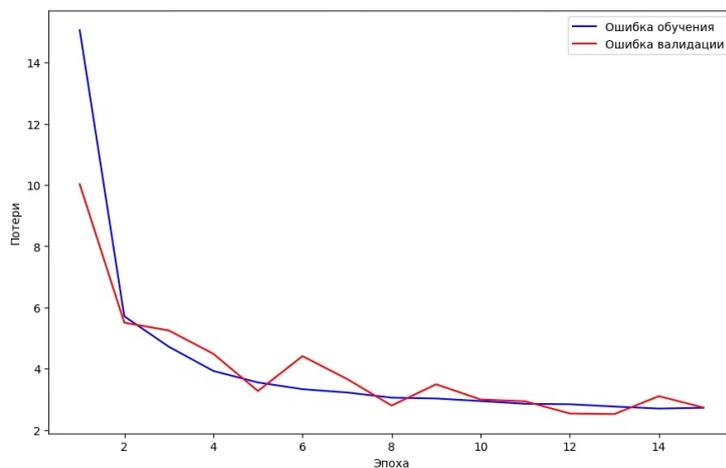


Рис. 7. График обучения НС на разреженных синтетических кадрах сети МКА

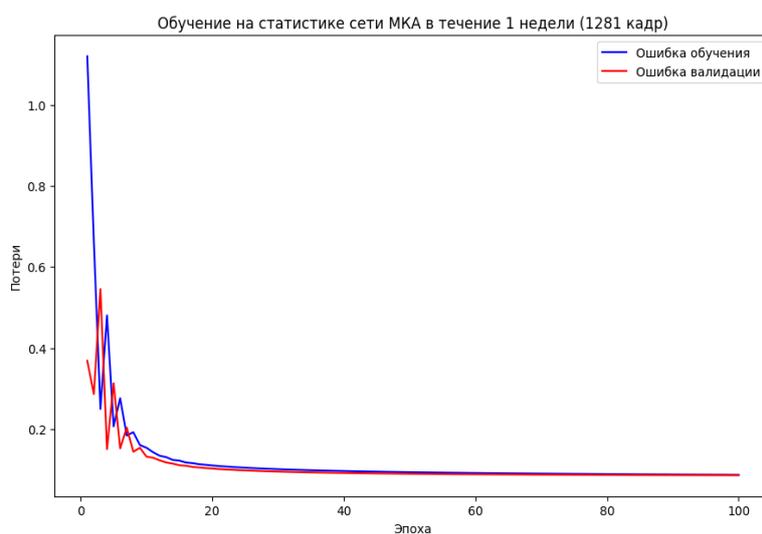


Рис. 8. График обучения НС на полностью связанных синтетических кадрах сети МКА

Процесс прогнозирования оперирует кадрами состояния сети. Выходными данными для прогноза являются телеметрические части кадров сети, в которых пространственные геодезические координаты МКА в заданные моменты времени рассчитываются на основании их TLE параметров, а также используются крайние зарегистрированные значения состояний аппаратной платформы каждого из них.

Аналогично обучению единицей входных данных при прогнозировании является кортеж сочетаний параметров пары МКА

$$\left\langle \left\langle p_i(t), \mathbf{V}_i(t) \right\rangle \times \left\langle p_j(t), \mathbf{V}_j(t) \right\rangle \right\rangle_{t=1}^{500}.$$

Прогнозирование, в отличие от обучения выполняется на каждом из кадров состояния сети независимо друг от друга, как показано на блок-схеме алгоритма (рис. 9).

Алгоритм прогнозирования на основе Transformer (рисунок 8) реализуется в каждом МКА, в нем проводится постоянное обучение на основе исторических данных о качестве связи с другими МКА группировки, квантованными с интервалом 10-30 сек. Результат прогнозирования – вещественные значения качества связи в диапазоне [0,1], где 0 – отсутствие связи.

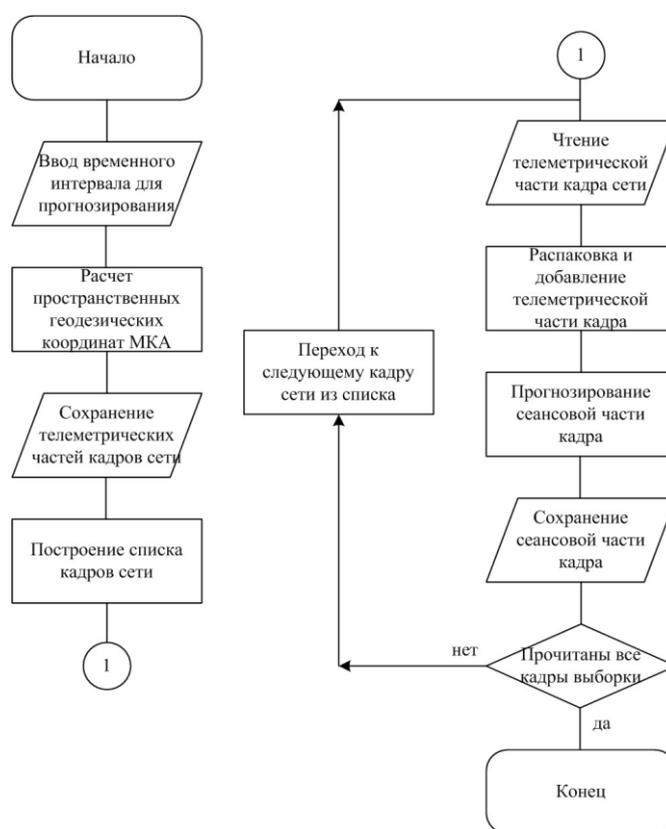


Рис. 9. Блок-схема алгоритма прогнозирования состояния сети МКА

Заключение:

1. Разработана программная система управления группировкой МКА, содержащая космическую и наземные части, взаимодействующие между собой в части передачи массивов координат и качества связи и состояний МКА. Программная система выполняет реконфигурацию как по текущему состоянию сети МКА (детерминированная реконфигурация), так и по историческим данным анализом НС Transformer скрытых закономерностей (адаптивная реконфигурация).

2. Модифицирована архитектура НС Transformer дополнением блоков, отвечающих за реализацию множественных межслойных связей, пятью слоями с остаточными связями (Residual Layers), выступающими в роли энкодера признаков входных данных, что позволило точнее выделять взаимосвязи между парами МКА и обеспечило повышение точности прогнозирования. Результаты работы нейронной сети используются для формирования команд на упреждающее изменение конфигурации сети путем исключения «проблемных» МКА из карты сети.

3. Разработаны аппаратно-программные средства для первичного обучения НС Transformer и ее последующего дообучения на основе разреженных и полносвязных синтетических данных. Определены алгоритмические средства для первичного обучения НС Transformer и ее последующего дообучения на основе синтетических данных. Результаты моделирования показали, что для группировки из 100-150 МКА с равномерным распределением начальных геодезических координат орбит и нормальным распределением высоты в диапазоне 300-600 км при создании временных рядов (длина кадра 500 элементов) состояний МКА с шагом составляет 12 измерений в минуту ($\Delta t = 5$ сек) точность прогнозирования повышается в 1,5-2 раза по сравнению с актуализацией группировки МКА только на фактических данных от широковещательной рассылки служебных сообщений. При этом применение полносвязных кадров сети МКА позволяет до трех раз уменьшить ошибку прогнозирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Абламейко С.В., Саечников В.А., Спиридонов А.А.* Малые космические аппараты. – 2012. – 159 с.
2. *Спиридонов А.А., Велиган В.А., Шалатонин И.А. [и др.]*. Низкоорбитальные группировки мало-размерных космических аппаратов // Квантовая электроника: Матер. XIII Международной научно-технической конференции. – Минск: БелГУ, 2021. – С. 421-424.
3. *Потюпкин А.Ю.* Управление многоспутниковыми орбитальными группировками // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2020. – Т. 7. – Вып. 3. – С. 61-70.
4. *Желтов С.Ю., Каляев И.А., Косьянчук В.В., Мельник Е.В., Зыбин Е.Ю.* Реконфигурация систем управления воздушных судов. – М.: Российская академия наук, 2021. – 204 с.
5. *Попков Г.В.* Mesh-сети: перспективы развития, возможные применения // Проблемы информатики. – 2012. – № 3 (15). – С. 74-79.
6. *Аганесов А.В., Макаренко С.И.* Балансировка информационной нагрузки между воздушным и космическим сегментами объединенной воздушно космической сети связи, построенной на основе mesh-технологии // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2016. Т. 8, № 1. – С. 17-25.
7. *Зацепин Э.С.* Характеристики протоколов в mesh-сетях // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2015. – № 1 (8). – https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2015/04/Zatsepin_1_15_1.pdf.
8. *Каляев И.А., Гайдук А.Р.* Однородные нейроподобные структуры в системах выбора действий интеллектуальных роботов. – М.: Изд-во «Янус-К», 2000. – 280 с.
9. *Каляев И.А., Гайдук А.Р.* Стайные принципы управления в группе объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 12. – С. 27-38.
10. *Каляев И.А., Капустян С.Г., Гайдук А.Р.* Самоорганизующиеся распределенные системы управления группами интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели // Управление большими системами: Сб. трудов. – 2010. – № 30-1. – С. 605-639.
11. *Каляев И.А., Мельник Э.В.* Децентрализованные системы компьютерного управления. – Ростов-на-Дону: Южный научный центр РАН, 2011. – 196 с.
12. *Каляев И.А., Капустян С.Г., Гайдук А.Р.* Распределенные системы планирования действий коллективов роботов. – М.: Издательство «Янус-К», 2002. – 292 с.
13. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: ООО Издательская фирма "Физико-математическая литература", 2009. – 280 с.
14. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Управление коллективом интеллектуальных объектов на основе стайных принципов // Вестник Южного научного центра РАН. – 2005. – Т. 1, № 2. – С. 20-27.
15. *Каляев А.И., Каляев И.А.* Метод мультиагентного диспетчирования ресурсов в облачных вычислительных средах // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2016. – № 2. – С. 51-63.

16. Емельянов С.Г. [и др.]. Выбор архитектуры нейронной сети для реализации когнитивных функций сетевого программного обеспечения управления группировкой взаимодействующих малых космических аппаратов // Известия Юго-западного государственного университета. Серия «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение». – 2023. – Т. 13, № 4. – С. 8-26.
17. Усатюк В.С., Егоров С.И., Локтионов А.П., Тютенко Е.А., Чернецкая И.Е. Архитектура нейронных сетей на основе кодов на графах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 5 (235). – С.81-92.
18. Tensorflow. – URL: <https://www.tensorflow.org/?hl=ru> (дата обращения: 29.01.2024).
19. Cafe. – URL: <https://caffe.berkeleyvision.org> (дата обращения: 29.01.2024).
20. osgEarth. – URL: <https://github.com/gwaldron/osgearth> (дата обращения: 29.01.2024).
21. Qt. – URL: <https://github.com/qt> (дата обращения: 29.01.2024).
22. Keras. – URL: <https://keras.io> (дата обращения: 29.01.2024).

REFERENCES

1. Ablameyko S.V., Saechnikov V.A., Spiridonov A.A. Malye kosmicheskie apparaty [Small spacecraft], 2012, 159 p.
2. Spiridonov A.A., Veligan V.A., SHalatonin I.A. [i dr.]. Nizkoorbital'nye gruppировки malorazmernykh kosmicheskikh apparatov [Low-orbit groupings of small-sized spacecraft], *Kvantovaya elektronika: Mater. XIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Quantum electronics: Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference]. Minsk: BelGU, 2021, pp. 421-424.
3. Potyupkin A.Yu. Upravlenie mnogosputnikovymi orbital'nymi gruppировkami [Control of multi-satellite orbital constellations], *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket and space instrumentation and information systems], 2020, Vol. 7, Issue 3, pp. 61-70.
4. Zheltov S.Yu., Kalyaev I.A., Kos'yanchuk V.V., Mel'nik E.V., Zybin E.Yu. Rekonfiguratsiya sistem upravleniya vozдушnykh sudov [Reconfiguration of aircraft control systems]. Moscow: Rossiyskaya akademiya nauk, 2021, 204 p.
5. Popkov G.V. Mesh-seti: perspektivy razvitiya, vozmozhnye primeneniya [Mesh networks: development prospects, possible applications], *Problemy informatiki* [Problems of computer science], 2012, No. 3 (15), pp. 74-79.
6. Aganov A.V., Makarenko S.I. Balansirovka informatsionno nagru ki me hdu vo dushnym i kosmicheskim segmentami ob"edinenno vo dushno kosmicheskoy seti svyaz i, postroenno na osnove mesh-tekhnologii [Balancing the information load between the air and space segments of an integrated aerospace communication network built on the basis of mesh technology], *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli* [Science-intensive technologies in space research of the Earth], 2016, Vol. 8, No. 1, pp. 17-25.
7. Zatsypin E.S. Kharakteristiki protokolov v mesh-setyakh [Characteristics of protocols in mesh networks], *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technologies], 2015, No. 1 (8). Available at: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2015/04/Zatsypin_1_15_1.pdf.
8. Kalyaev I.A., Gayduk A.R. Odnorodnye neyropodobnye struktury v sistemakh vybora deystviy intellektual'nykh robotov [Homogeneous neural-like structures in action selection systems of intelligent robots]. Moscow: Izd-vo «YAnus-K», 2000, 280 p.
9. Kalyaev I.A., Gayduk A.R. Staynye printsipy upravleniya v gruppe ob"ektov [Flock principles of control in a group of objects], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2004, No. 12, pp. 27-38.
10. Kalyaev I.A., Kapustyan S.G., Gayduk A.R. Samoorganizuyushchiesya raspredelennye sistemy upravleniya gruppami intellektual'nykh robotov, postroennye na osnove setevoy modeli [Self-organizing distributed systems for managing groups of intelligent robots, built on the basis of a network model], *Upravlenie bol'shimi sistemami: Sb. trudov* [Management of large systems: Collection of works], 2010, No. 30-1, pp. 605-639.
11. Kalyaev I.A., Mel'nik E.V. Detsentralizovannye sistemy komp'yuternogo upravleniya [Decentralized computer control systems]. Rostov-on-Don: Yuzhnyy nauchnyy tsentr RAN, 2011, 196 p.
12. Kalyaev I.A., Kapustyan S.G., Gayduk A.R. Raspredelennye sistemy planirovaniya deystviy kolektivov robotov [Distributed systems for planning the actions of teams of robots]. Moscow: I datel'stvo «YAnus-K», 2002, 292 p.
13. Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G. Modeli i algoritmy kolektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Models and algorithms for collective control in groups of robots]. Moscow: OOO Izdatel'skaya firma "Fiziko-matematicheskaya literatura", 2009, 280 p.

14. Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G. Upravlenie kolektivom intellektual'nykh ob'ektov na osnove staynykh printsipov [Management of a collective of intellectual objects based on flock principles], *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2005, Vol. 1, No. 2, pp. 20-27.
15. Kalyaev A.I., Kalyaev I.A. Metod mul'tiagentnogo dispetchirovaniya resursov v oblachnykh vychislitel'nykh sredakh [Method of multi-agent resource dispatching in cloud computing environments], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestia of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems], 2016, No. 2, pp. 51-63.
16. Emel'yanov S.G. [i dr.]. Vybor arkhitektury neyronnoy seti dlya realizatsii kognitivnykh funktsiy setevogo programmnoho obespecheniya upravleniya gruppirovkoy vzaimodeystvuyushchikh malyykh kosmicheskikh apparatov [Selecting a neural network architecture for implementing cognitive functions of network software for controlling a group of interacting small spacecraft], *Izvestiya Yugo-zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie»* [News of the South-Western State University. Series "Management, computer technology, information science. Medical instrumentation"], 2023, Vol. 13, No. 4, pp. 8-26.
17. Usatyuk V.S., Egorov S.I., Loktionov A.P., Titenko E.A., Chernetskaya I.E. Arkhitektura neyronnykh setey na osnove kodov na grafakh [Architecture of neural networks based on graph codes], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 5 (235), pp. 81-92.
18. Tensorflow. Available at: <https://www.tensorflow.org/?hl=ru> (accessed 29.01.2024).
19. Cafe. Available at: <https://caffe.berkeleyvision.org> (accessed 29.01.2024).
20. osgEarth. Available at: <https://github.com/gwaldron/osgearth> (accessed 29.01.2024).
21. Qt. Available at: <https://github.com/qt> (accessed 29.01.2024).
22. Keras. Available at: <https://keras.io> (accessed 29.01.2024).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Г.Е. Веселов.

Емельянов Сергей Геннадьевич – Юго-Западный государственный университет; г. Курск, Россия; e-mail: rector@swsu.ru; д.т.н.; профессор; ректор.

Фролов Сергей Николаевич – e-mail: snfrolov@mail.ru; к.т.н.; заместитель директора научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем.

Титенко Евгений Анатольевич – e-mail: johntit@mail.ru; тел.: +79051588904; к.т.н.; доцент; ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем.

Тетерин Дмитрий Павлович – e-mail: teterdp@mail.ru; д.т.н.; профессор; главный научный сотрудник научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем.

Локтионов Аскольд Петрович – e-mail: loapa@mail.ru; д.т.н.; доцент; главный научный сотрудник центра по координации академической и вузовской науки, научной и образовательной деятельности.

Emelyanov Sergey Gennadievich – Southwest State University; e-mail: rector@swsu.ru; Kursk, Russia; dr. of eng. sc.; professor; rector.

Frolov Sergey Nikolaevich – e-mail: snfrolov@mail.ru; cand. of eng. sc.; deputy director of the Research Institute of Space Instrumentation and Radioelectronic Systems.

Titenko Evgeny Anatolievich – e-mail: johntit@mail.ru; phone: +79051588904; cand. of eng. sc.; associate professor, leading researcher of the Research Institute of Space Instrumentation and Radioelectronic Systems.

Teterin Dmitry Pavlovich – e-mail: teterdp@mail.ru; dr. of eng. sc.; professor; chief researcher of the Research Institute of Space Instrumentation and Radio-Electronic Systems.

Loktionov Askold Petrovich – e-mail: loapa@mail.ru; dr. of eng. sc.; associate professor; chief researcher Center for the Coordination of Academic and University Science.

Л.К. Хаджиева, В.В. Котенко, К.Е. Румянцев

НЕЙРОЛИНГВИСТИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Приведены результаты исследований возможностей применения языка и его составляющих (текстовой и речевой) как факторов нейролингвистической идентификации и аутентификации интеллектуальных систем (ИС), носителей русского и чеченского языка. Для достижения целей исследований использовался подход, основанный на информационной виртуализации. Предполагается использование одного из путей решения проблем повышения эффективности идентификации и аутентификации, которым является применение фактора языковой нейролингвистической текстовой идентификации и аутентификации. Исследования показывают, во-первых, что при изменении языка, в случае использования интеллектуальной системы как носителей нескольких языков, наблюдается изменение параметров нейролингвистической идентификации, во-вторых, что если все интеллектуальные системы являются носителями одного языка, то при переходе от одной интеллектуальной системы к другой происходит изменение параметров нейролингвистической идентификации. Таким образом в исследовании определено, что язык интеллектуальной системы может использоваться как фактор идентификации и аутентификации. Исследованы ИС, являющиеся носителями как чеченского, так и русского языка. На первом этапе исследованы десять ИС как носители русского языка, а на втором этапе – те же десять ИС, но как носители чеченского языка. Приведены результаты зависимости основных параметров, а также зависимости производных параметров нейролингвистической текстовой идентификации интеллектуальных систем носителей русского и чеченского языка. Полученные результаты открывают принципиально новую возможность исследований в направлении нейролингвистической текстовой идентификации и аутентификации. Исследования в этом направлении представляют научный и практический интерес, как для случая идентификации интеллектуальной системы носителей одного языка, так и для случая, когда одна интеллектуальная система является носителем множества языков.

Интеллектуальная система; диапазон идентичности; нейролингвистическая идентификация; избыточность; вербальность.

L.K. Khadzhieva, V.V. Kotenko, K.Ye. Rumyantsev

NEUROLINGUISTIC INFORMATION IDENTIFICATION OF INTELLIGENT SYSTEMS

The results of studies of the possibilities of using language and its components (text and speech) as factors of neurolinguistic identification and authentication of intelligent systems (IS) of native speakers of Russian and Chechen languages are presented. To achieve the research goals, an approach based on information virtualization was used. It is proposed to use one of the ways to solve the problems of increasing the efficiency of identification and authentication, which is the use of the factor of linguistic neurolinguistic text identification and authentication. Research shows, firstly, that when a language changes, in the case of using an intelligent system as a speaker of several languages, there is a change in the parameters of neurolinguistic identification, and secondly, that if all intelligent systems are native speakers of the same language, then when moving from one intellectual system to the other is a change in the parameters of neurolinguistic identification. Thus, the study determined that the language of an intelligent system can be used as an identification and authentication factor. IP speakers who are native speakers of both Chechen and Russian languages have been studied. At the first stage, ten IPs were studied as native speakers of the Russian language, and at the second stage, the same ten IPs were studied, but as native speakers of the Chechen language. The results of the dependence of the main parameters, as well as the dependence of the derived parameters of neurolinguistic text identification of intellectual systems of native speakers of Russian and Chechen languages are presented. The results obtained open up a fundamentally new opportunity for research in the direction of neurolinguistic text identification and authentication. Research in this direction is of scientific and practical interest, both for the case of identifying an intellectual system of native speakers of one language, and for the case when one intellectual system is a native speaker.

Intelligent system; identity range; neurolinguistic identification; redundancy coefficient; verballity coefficient.

Введение. Факторы идентификации и аутентификации делятся на три группы. Первая группа основывается на том, что известно пользователю (разные виды паролей, семантическая идентификация, схема «отклик-отзыв»). Вторая группа фокусируется на том, что есть у пользователя (некоторый предмет, специальное устройство для идентификации и аутентификации – как персональные идентификаторы в виде флешек, iToken, ruToken, ключей от домофонов и т.п.). И, наконец, третья группа основывается на том, что является неотъемлемой и уникальной частью пользователя (биометрические системы). На основе этих факторов строятся различные механизмы идентификации и аутентификации, обладающие разными свойствами. Особое внимание в настоящее время уделяется развитию третьей группы факторов. Об этом свидетельствует принятие Федерального закона №572 от 29 декабря 2022 г., определяющего задачи биометрической идентификации и аутентификации. Одним из путей решения проблем повышения эффективности идентификации и аутентификации применительно к третьей группе факторов может являться применение фактора языковой нейролингвистической текстовой идентификации и аутентификации.

Постановка задачи. Идентификация языка (англ. language identification), в методике обработки естественного языка, – это определение языка. Проблема идентификации языка является особым случаем категоризации текста и решается с использованием статистических методов.

Целью исследования является анализ и определение возможностей применения языка и его составляющих (текстовой и речевой) как факторов нейролингвистической идентификации и аутентификации интеллектуальных систем, носителей русского и чеченского языка.

Информационная виртуализация. Для достижения поставленной цели использовался подход, основанный на информационной виртуализации [1–3]. Виртуализация (ср. лат. *virtualis* – возможное при определенных условиях) означает реализация возможного при заданных определенных условиях. Виртуализация предполагает установку условий, обеспечивающих оптимальное решение поставленной задачи, но выходящих за рамки общепринятых представлений и существующих авторитетных научных ограничений. Другими словами, виртуализация наиболее эффективна тогда, когда общепринятые представления и ограничения не допускают оптимальное решение, а иногда и само решение, поставленной задачи. При этом в области виртуальных представлений такое решение возможно [3].

На основании описанного в [1] подхода установлены условия виртуализации:

1. Человек представляется как интеллектуальная система (ИС), характеризующаяся текстовой и речевой составляющей языка.
2. Интеллектуальная система может быть носителем нескольких языков.
3. Интеллектуальная система представляет собой источник информации, выборочное пространство и вероятностная мера которого определяется текстовой составляющей языка носителем которого является ИС.
4. Энтропия источника информации ИС как источник информации стремится к эмпирической энтропии.
5. Основными параметрами нейролингвистической текстовой идентификации ИС являются: энтропия (H_B); информационная емкость (H_{Bmax}); избыточность (B).
6. Параметры ИС могут изменяться во времени.

Для определения параметров применялся апробированный программный комплекс [1], синтезированный на основании исследования, интерфейс которого приведен на рис. 1.

Результаты исследований. Исследованы ИС, являющиеся носителями как чеченского, так и русского языка. На первом этапе рассматривались десять ИС как носители русского языка, а на втором этапе – те же десять ИС, но как носители чеченского языка.

Таблица 2

**Параметры нейролингвистической текстовой идентификации ИС носителей
чеченского языка**

Интеллектуальная система	Информационная емкость H_{Bmax}	Энтропия H_B	Избыточность B
ИС1-Ч	4,95	1,79	3,16
ИС2-Ч	5,49	1,87	3,62
ИС3-Ч	5,52	1,81	3,71
ИС4-Ч	5,32	1,82	3,51
ИС5-Ч	5,61	1,91	3,70
ИС-6Ч	5,09	1,87	3,22
ИС-7Ч	4,46	1,71	2,75
ИС-8Ч	5,16	1,72	3,43
ИС-9Ч	4,52	1,69	2,84
ИС-10Ч	4,62	1,75	2,87

Результаты исследования зависимости основных параметров нейролингвистической текстовой идентификации ИС носителей русского и чеченского языка приведены на рис. 2–4.

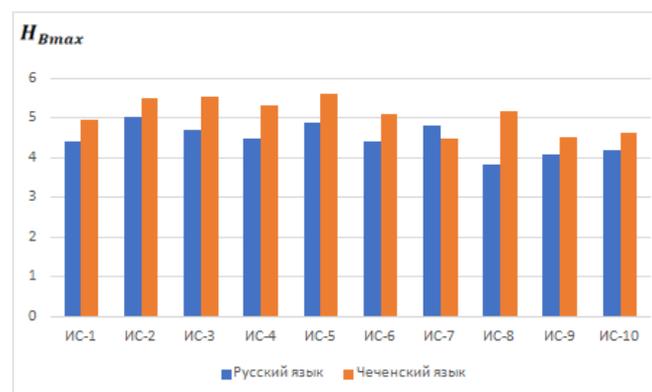
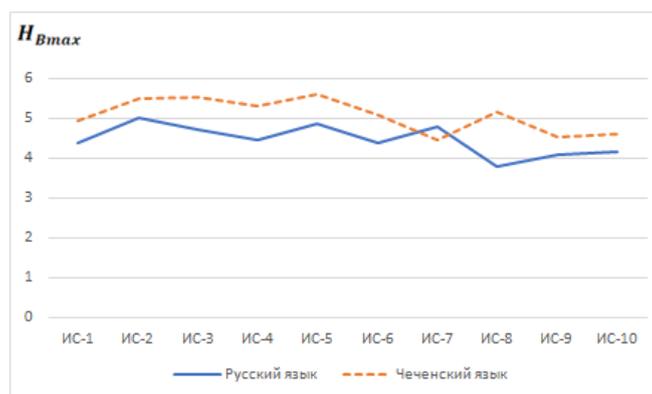


Рис. 2. Информационная емкость текста ИС носителей русского и чеченского языка интеллектуальных систем

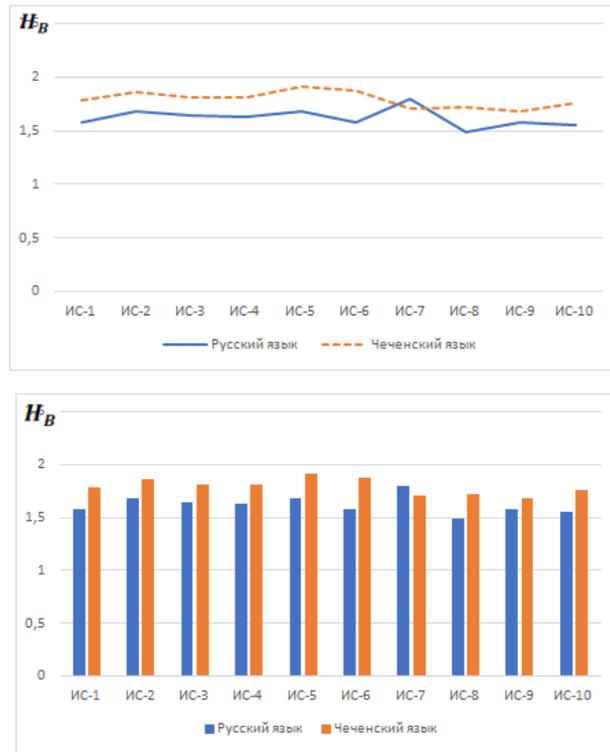


Рис. 3. Энтропия текста ИС носителей русского и чеченского языка

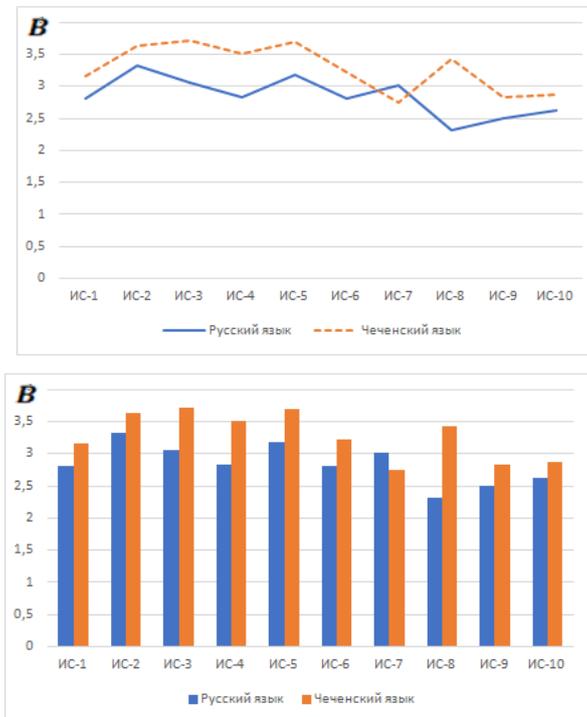


Рис. 4. Избыточность текста ИС носителей русского и чеченского языка

Обсуждение результатов исследований. Полученные результаты показывают, что минимальное значение информационной емкости текста носителей русского языка соответствует интеллектуальной системе ИС09-Р – $\dot{H}_{Bmax} = 4,09$. Максимальное значение информационной емкости текста носителей русского языка соответствует интеллектуальной системе ИС2-Р – $\dot{H}_{Bmax} = 5,02$. Среднее значение информационной емкости текста носителей русского языка – $\dot{H}_{Bmax} = 4,55$. Минимальное значение энтропии текста носителей русского языка соответствует интеллектуальной системе ИС10-Р – $\dot{H}_B = 1,55$. Максимальное значение энтропии текста носителей русского языка соответствует интеллектуальной системе ИС2-Р – $\dot{H}_B = 1,69$. Среднее значение энтропии текста носителей русского языка – $\dot{H}_B = 1,62$. Минимальное значение избыточности текста носителей русского языка соответствует интеллектуальной системе ИС9-Р – $V = 2,51$. Максимальное значение избыточности текста носителей русского языка соответствует интеллектуальной системе ИС2-Р – $V = 3,33$. Среднее значение избыточности – $V = 2,92$.

Полученные результаты показывают, что минимальное значение информационной емкости текста носителей чеченского языка соответствует интеллектуальной системе ИС7-Ч – $\dot{H}_{Bmax} = 4,46$. Максимальное значение информационной емкости текста носителей чеченского языка соответствует интеллектуальной системе ИС5-Ч – $\dot{H}_{Bmax} = 5,61$. Среднее значение информационной емкости текста носителей чеченского языка – $\dot{H}_{Bmax} = 5,04$. Минимальное значение энтропии текста носителей чеченского языка соответствует интеллектуальной системе ИС9-Ч – $\dot{H}_B = 1,69$. Максимальное значение энтропии текста носителей чеченского языка соответствует интеллектуальной системе ИС2-Ч – $\dot{H}_B = 1,87$. Среднее значение энтропии текста носителей чеченского языка – $\dot{H}_B = 1,78$. Минимальное значение избыточности текста носителей чеченского языка соответствует интеллектуальной системе ИС7-Ч – $V = 2,75$. Максимальное значение избыточности текста носителя чеченского языка соответствует интеллектуальной системе ИС3-Ч – $V = 3,71$. Среднее значение избыточности текста носителя чеченского языка – $V = 3,23$.

Средние значения основных параметров нейролингвистических текстовых идентификаторов ИС носителей русского и чеченского языков приведены в табл. 3.

Таблица 3

Среднее значение параметров нейролингвистических текстовых идентификаторов ИС носителей русского и чеченского языков

Язык	Среднее значение информационной емкости \dot{H}_{Bmax}	Среднее значение энтропии \dot{H}_B	Среднее значение избыточности V
Русский	4,55	1,62	2,92
Чеченский	5,04	1,78	3,23

В табл. 4 и 5 сведены результаты расчётов производных параметров нейролингвистической текстовой идентификации, а именно:

коэффициента избыточности

$$\mu_B = \frac{H_{Bmax} - H_B}{H_{Bmax}}$$

и коэффициента вербальности

$$G_B = \frac{H_B}{H_{Bmax} - H_B}.$$

Результаты исследования зависимости производных параметров нейролингвистической текстовой идентификации ИС носителей русского и чеченского языка приведены на рис. 5 и 6.

Таблица 4

**Производные параметры нейролингвистической текстовой идентификации
ИС носителей русского языка**

Интеллектуальная система	Коэффициент избыточности, μ_B	Коэффициент вербальности, G_B
ИС1-Р	0,642	0,558
ИС2-Р	0,663	0,507
ИС3-Р	0,651	0,535
ИС4-Р	0,633	0,580
ИС5-Р	0,653	0,532
ИС6-Р	0,639	0,563
ИС7-Р	0,625	0,599
ИС8-Р	0,609	0,541
ИС9-Р	0,614	0,628
ИС10-Р	0,620	0,592

Таблица 5

**Производные параметры нейролингвистической текстовой идентификации
ИС носителей чеченского языка**

Интеллектуальная система	Коэффициент избыточности μ_B	Коэффициент вербальности G_B
ИС-1Ч	0,659	0,565
ИС-2Ч	0,680	0,525
ИС-3Ч	0,672	0,609
ИС-4Ч	0,659	0,618
ИС-5Ч	0,669	0,557
ИС-6Ч	0,642	0,582
ИС-7Ч	0,616	0,624
ИС-8Ч	0,645	0,571
ИС-9Ч	0,627	0,655
ИС-10Ч	0,639	0,612

Полученные результаты показывают, что минимальное значение коэффициента избыточности текста русского языка соответствует интеллектуальной системе ИС8-Р – $\mu_B = 0,609$. Максимальное значение коэффициента избыточности текста русского языка соответствует интеллектуальной системе ИС2-Р – $\mu_B = 0,663$. Среднее значение коэффициента избыточности – $\mu_B = 0,586$. Минимальное значение коэффициента вербальности текста русского языка соответствует интеллектуальной системе ИС2-Р – $G_B = 0,507$. Максимальное значение коэффициента вербальности текста русского языка соответствует интеллектуальной системе ИС9-Р – $G_B = 0,628$. Среднее значение коэффициента вербальности – $G_B = 0,538$.

Полученные результаты показывают, что минимальное значение коэффициента избыточности текста чеченского языка соответствует интеллектуальной системе ИС10-Ч – $\mu_B = 0,616$. Максимальное значение коэффициента избыточности текста чеченского языка соответствует интеллектуальной системе ИС5-Ч – $\mu_B = 0,669$. Среднее значение коэффициента избыточности – $\mu_B = 0,642$. Минимальное значение коэффициента вербальности текста чеченского языка соответствует интеллектуальной системе ИС2-Ч – $G_B = 0,525$. Максимальное значение коэффициента вербальности текста чеченского языка соответствует интеллектуальной системе ИС9-Ч – $G_B = 0,655$. Среднее значение коэффициента вербальности – $G_B = 0,590$.



Рис. 5. Коэффициент избыточности текста русского и чеченского языка интеллектуальных систем



Рис. 6. Коэффициент вербальности текста русского и чеченского языка интеллектуальных систем

Средние значения коэффициентов избыточности и вербальности идентификаторов ИС носителей русского и чеченского языков приведены в табл. 6.

Таблица 6

Среднее значение коэффициентов избыточности и вербальности ИС носителей русского и чеченского языка

Язык	Среднее значение коэффициента избыточности μ_B	Среднее значение коэффициента вербальности G_B
Русский	0,586	0,538
Чеченский	0,642	0,590

Обсуждение результатов исследований. В результате проведенных исследований установлено следующее.

Во-первых, при изменении языка, в случае использования ИС как носителей нескольких языков, наблюдается существенное изменение параметров нейролингвистической идентификации. В среднем это выражается в следующих значениях: информационная емкость на 9,6%; энтропия на 8,9%; избыточность на 9,6%; коэффициент избыточности на 8,7%; коэффициент вербальности на 8,8%.

Во-вторых, если все ИС являются носителями одного языка, то при переходе от одной ИС к другой происходит изменение параметров нейролингвистической идентификации. В среднем для чеченского языка это выражается в следующих значениях: информационная емкость – на 20,4%; энтропия на 9,6%; избыточность на 26%; коэффициента избыточности на 25%; коэффициент вербальности на 19%. Аналогично для русского языка это выражается в следующих значениях: информационная емкость – на 18,4%; энтропия на 8,1%; избыточность на 24,5%, коэффициента избыточности на 8,1%; коэффициент вербальности на 19%.

Заключение. Подводя итоги отметим, что задача исследования заключалась в проведении анализа и определении возможностей применения языка и его составляющих (текстовой и речевой) как факторов нейролингвистической идентификации и аутентификации интеллектуальных систем, носителей русского и чеченского языка.

Результаты проведенных исследований показали, что при изменении языка, в случае использования ИС как носителей нескольких языков, наблюдается изменения параметров нейролингвистической идентификации. Если все ИС являются носителями одного языка, то при переходе от одной ИС к другой также происходит изменение параметров нейролингвистической идентификации. В исследовании приведены результаты зависимости основных и производных параметров нейролингвистической текстовой идентификации интеллектуальных систем носителей русского и чеченского языка

Язык интеллектуальной системы и его составляющие (текстовой и речевой) можно использовать как фактор нейролингвистической идентификации и аутентификации интеллектуальных систем. Полученные результаты открывают принципиально новую возможность исследований в направлении нейролингвистической текстовой идентификации и аутентификации. Дальнейшие исследования в этом направлении представляют научный и практический интерес как для случая идентификации ИС носителей одного языка, так и для случая, когда одна ИС является носителем множества языков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Котенко В.В.* Технологии информационного анализа пользовательского уровня телекоммуникационных систем: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 194 с.
2. *Котенко В.В.* Теория виртуализации и защита телекоммуникаций: монография. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – 236 с.
3. *Котенко В.В. Румянцев К.Е., Котенко С.В.* Методология идентификационного анализа инфокоммуникационных систем: монография. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2014. – 315 с.
4. Федеральный закон №572 от 29 декабря 2022 г. «Об осуществлении идентификации и (или) аутентификации физических лиц с использованием биометрических персональных данных».

5. *Котенко С.В., Першин И.М., Котенко В.В.* Особенности идентификационного анализа на основе информационной виртуализации изображений местоположения объектов в ГИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 8 (157). – С. 212-219.
6. *Котенко В.В., Савина Д.А.* Комплекс формирования информационных образов для системы аутентификации // Высшая школа: научные исследования: Матер. Межвузовского международного конгресса. – М., 2022. – С. 91-100.
7. *Пронь Е.В.* Биометрическая система контроля доступа на закрытые объекты путем распознавания лиц людей в толпе по сигналам с камер видеонаблюдения // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2017. – Т. 2. – С. 218-220.
8. *Корниенко В.Т., Гиниятуллин Л.П.* Использование акустической голографии в системах видеонаблюдения оптически непрозрачных контролируемых объемов // Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2010. – № 15. – С. 123-126.
9. *Котенко В.В.* Принципы кодирования для канала с позиций виртуального представления выборочных пространств ансамблей сообщений и кодовых комбинаций // Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2005. – № 3. – С. 65-70.
10. *Котенко В.В., Левендян И.Б.* Формирование виртуального образа личности при решении задач аутентификации // Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2005. – № 4. – С. 107-110.
11. *Котенко В.В.* Новый подход к оценке информационного образа объекта исследования с позиций теории виртуального познания // Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2005. – № 4. – С. 17-26.
12. *Котенко В.В.* Оптимизация стратегии шифрования на основе виртуализации информационных потоков // Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2005. – № 5. – С. 56-58.
13. *Котенко В.В., Левендян И.Б., Поликарпов С.В.* Новый подход к защите аудиоинформации с позиции виртуального скремблирования // Фундаментальные исследования. – 2004. – № 6. – С. 68.
14. *Котенко В.В.* Новый подход к аутентификации в телекоммуникационных и банковских системах // Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2004. – № 2. – С. 21-23.
15. *Котенко В.В., Румянцев К.Е., Поликарпов С.В.* Стратегия моделирования интеллектуальных систем // Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2002. – № 1. – С. 58-60.
16. *Брюхомицкий Ю.А., Казарин М.Н.* Биометрическая аутентификация пользователя на основе параметрического обучения классификатора // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. – 2003. – № 4 (16). – С. 22-31.
17. *Шуман Е.А., Кучеров А.И.* Проверка идентифицированного пользователя на предмет соответствия личности // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: Матер. XII Республиканская научная конференция студентов и аспирантов (16-18 марта 2009 г, Гомель). – Т. 2. – Гомель: Изд-во ГГУ, 2009. – С. 259-260.
18. *Liu Juan, Hu Min, Wang Ying, Huang Zhong, Jiang Julang.* Symmetric Multi-Scale Residual Network Ensemble with Weighted Evidence Fusion Strategy for Facial Expression Recognition // Symmetry. – 2023. – 15 (6). – P. 1228. – <https://doi.org/10.3390/sym15061228>.
19. *Litvinova T.* Authorship attribution of russian social media texts: does the volume of data favor idiolect identification? // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 315 LNNS. – P. 352-362.
20. *Литвинова Т.А.* Стилеметрическая идентификация идиолекта на основе принципов корпусной идиолектологии // Вопросы криминологии, криминалистики и судебной экспертизы. – 2021. – № 1 (49). – С. 126-132.

REFERENCES

1. *Kotenko V.V.* Tekhnologii informatsionnogo analiza pol'zovatel'skogo urovnya telekommunikatsionnykh sistem: ucheb. posobie [Technologies for information analysis of the user level of telecommunication systems: a textbook]. Rostov-on-Don – Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, 194 p.
2. *Kotenko V.V.* Teoriya virtualizatsii i zashchita telekommunikatsiy: monografiya [The theory of virtualization and telecommunications protection: monograph]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2011, 236 p.
3. *Kotenko V.V., Rumyantsev K.E., Kotenko S.V.* Metodologiya identifikatsionnogo analiza infokommunikatsionnykh sistem: monografiya [Methodology of identification analysis of infocommunication systems: monograph]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2014, 315 p.
4. Federal'nyy akon №572 ot 29 dekabrya 2022 g. «Ob osushchestvlenii identifikatsii i (ili) autentifikatsii fi ic heskikh lits s ispol' ovaniem biometricheskikh personal'nykh dannykh» [Federal Law No. 572 of December 29, 2022 “On the identification and (or) authentication of individuals using biometric personal data”].

5. *Kotenko S.V., Pershin I.M., Kotenko V.V.* Osobennosti identifikatsionnogo analiza na osnove informatsionnoy virtualizatsii izobrazheniy mestopolozheniya ob'ektov v GIS [Features of identification analysis based on information virtualization of images of the location of objects in GIS], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, № 8 (157), pp. 212-219.
6. *Kotenko V.V., Savina D.A.* Kompleks formirovaniya informatsionnykh obrazov dlya sistemy autentifikatsii [Complex of formation of information images for the authentication system], *Vysshaya shkola: nauchnye issledovaniya: Mater. Mezhvuzovskogo mezhdunarodnogo kongressa* [Higher school: scientific research: Materials of the Interuniversity International Congress]. Moscow, 2022, pp. 91-100.
7. *Pron' E.V.* Biometricheskaya sistema kontrolya dostupa na zakrytye ob'ekty putem raspoznavaniya lits lyudey v tolpe po signalam s kamer videonablyudeniya [Biometric access control system to closed facilities by recognizing the faces of people in a crowd using signals from CCTV cameras], *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Current problems of aviation and astronautics], 2017, Vol. 2, pp. 218-220.
8. *Kornienko V.T., Giniyatullin L.P.* Ispol'zovanie akusticheskoy golografii v sistemakh videonablyudeniya opticheski neprozrachnykh kontroliruemykh ob'emov [The use of acoustic holography in video surveillance systems of optically opaque controlled volumes], *Informatsionnoe protivodeystvie ugrozam terrorizma* [Information counteraction to the threats of terrorism], 2010, No. 15, pp. 123-126.
9. *Kotenko V.V.* Printsipy kodirovaniya dlya kanala s pozitsiy virtual'nogo predstavleniya vyborochnykh prostranstv ansambley soobshcheniy i kodovykh kombinatsiy [Principles of coding for a channel from the standpoint of virtual representation of sample spaces of ensembles of messages and code combinations], *Informatsionnoe protivodeystvie ugrozam terrorizma* [Information counteraction to the threats of terrorism], 2005, No. 3, pp. 65-70.
10. *Kotenko V.V., Levendyan I.B.* Formirovanie virtual'nogo obraza lichnosti pri reshenii zadach autentifikatsii [Formation of a virtual image of a person when solving authentication problems], *Informatsionnoe protivodeystvie ugrozam terrorizma* [Information counteraction to the threats of terrorism], 2005, No. 4, pp. 107-110.
11. *Kotenko V.V.* Novyy podkhod k otsenke informatsionnogo obraza ob'ekta issledovaniya s pozitsiy teorii virtual'nogo poznaniya [A new approach to assessing the information image of a research object from the perspective of the theory of virtual cognition], *Informatsionnoe protivodeystvie ugrozam terrorizma* [Information counteraction to the threats of terrorism], 2005, No. 4, pp. 17-26.
12. *Kotenko V.V.* Optimizatsiya strategii shifrovaniya na osnove virtualizatsii informatsionnykh potokov [Optimization of encryption strategy based on virtualization of information flows], *Informatsionnoe protivodeystvie ugrozam terrorizma* [Information counteraction to the threats of terrorism], 2005, No. 5, pp. 56-58.
13. *Kotenko V.V., Levendyan I.B., Polikarpov S.V.* Novyy podkhod k zashchite audioinformatsii s pozitsiy virtual'nogo skremblirovaniya [A new approach to protecting audio information from the perspective of virtual scrambling], *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2004, No. 6, pp. 68.
14. *Kotenko V.V.* Novyy podkhod k autentifikatsii v telekommunikatsionnykh i bankovskikh sistemakh [A new approach to authentication in telecommunications and banking systems], *Informatsionnoe protivodeystvie ugrozam terrorizma* [Information counteraction to the threats of terrorism], 2004, No. 2, pp. 21-23.
15. *Kotenko V.V., Rumyantsev K.E., Polikarpov S.V.* Strategiya modelirovaniya intellektual'nykh sistem [Strategy for modeling intelligent systems], *Informatsionnoe protivodeystvie ugrozam terrorizma* [Information counteraction to the threats of terrorism], 2002, No. 1, pp. 58-60.
16. *Bryukhomitskiy Yu.A., Kazarin M.N.* Biometricheskaya autentifikatsiya pol'zovatelya na osnove parametricheskogo obucheniya klassifikatora [Biometric user authentication based on parametric training of a classifier], *Perspektivnye informatsionnye tekhnologii i intellektual'nye sistemy* [Perspective information technologies and intelligent systems], 2003, No. 4 (16), pp. 22-31.
17. *Shuman E.A., Kucherov A.I.* Proverka identifitsirovannogo pol'zovatelya na predmet sootvetstviya lichnosti [Checking the identified user for identity matching], *Novye matematicheskie metody i komp'yuternye tekhnologii v proektirovanii, proizvodstve i nauchnykh issledovaniyakh: Mater. XII Respublikanskaya nauchnaya konferentsiya studentov i aspirantov (16-18 marta 2009 g, Gomel')* [New mathematical methods and computer technologies in design, production and scientific research: Proceedings of the XII Republican Scientific Conference of Students and Postgraduate Students (March 16-18, 2009, Gomel)]. Vol. 2. Gomel': Izd-vo GGU, 2009, pp. 259-260.
18. *Liu Juan, Hu Min, Wang Ying, Huang Zhong, Jiang Julang.* Symmetric Multi-Scale Residual Network Ensemble with Weighted Evidence Fusion Strategy for Facial Expression Recognition, *Symmetry*, 2023, 15 (6), pp. 1228. Available at: <https://doi.org/10.3390/sym15061228>.

19. Litvinova T. Authorship attribution of russian social media texts: does the volume of data favor idiolect identification?, *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, Vol. 315 LNNS, pp. 352-362.
20. Litvinova T.A. Stilemetricheskaya identifikatsiya idiolekta na osnove printsipov korpusnoy idiolektologii [Stylemetric identification of idiolect based on the principles of corpus idiolectology], *Voprosy kriminologii, kriminalistiki i sudebnoy ekspertizy* [Issues of criminology, forensics and forensic examination], 2021, No. 1 (49), pp. 126-132.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. Ю.А. Брюхомицкий.

Хаджиева Лаура Куяраевна – Грозненский государственный нефтяной технический университет имени М.Д. Миллионщикова; e-mail: laura.hadjieva3009@mail.ru; г. Грозный, Россия; тел.: 89380230505; кафедра информатики и вычислительной техники; старший преподаватель.

Котенко Владимир Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: kotenkovv@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89043468665; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; к.т.н.; доцент.

Румянцев Константин Евгеньевич – e-mail: rke2004@mail.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: 89281827209; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; д.т.н.; профессор, зав. кафедрой.

Khadzhiyeva Laura Kuyraevna – Grozny State Petroleum Technical University named after M.D. Millionshchikova; e-mail: laura.hadjieva3009@mail.ru; Grozny, Russia; phone: +79380230505; the Department of Informatics and Computer Science; senior lecturer.

Kotenko Vladimir Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: kotenkovv@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79043468665; the Department of Information Security of Telecommunication Systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Rumyantsev Konstantin Yevgenievich – e-mail: rke2004@mail.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79281827209; the Department of Information Security of Telecommunication Systems; dr. of eng. sc.; professor; head of department.

УДК 629.3

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-44-54

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДА РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ГУМАНИТАРНОГО РАЗМИНИРОВАНИЯ

Целью исследования является разработка методики, позволяющей рассчитать основные параметры, характеризующие способность робототехнического средства, оснащенного бойковым минным тралом выполнять операции по гуманитарному разминированию. Для этого в рамках данной работы были решены задачи как расчет крутящего момента на валу бойкового трала, определение мощности приводящего бойковый трал мотора, а расчетной оценки мощности силовой установки робототехнического средства. В ходе проведения исследований был проанализирован опыт создания и основные параметры зарубежных средств разминирования с бойковыми минными тралами – экипажной машины разминирования Hудгreta 910 MCV, робототехнического средства разминирования MV-4, дистанционно-управляемой машины разминирования ДУМ-Р «Уран-6», дистанционно-управляемого минного трала МТ-2. Также были проанализированы основные особенности рабочего органа рассматриваемых машин, а именно бойкового минного трала. В основу разработанной методики положена методика расчета силы сопротивления разрушения грунта и взрывоопасного предмета ВОП при воздействии байком, опирающаяся на теорию взаимодействия рабочих органов землеройных машин, разработанную академиком Н.Г. Домбровским. Также при разработке данной методики были использованы результаты работ по расчету конструкции бойкового трала выполненные хорватскими специалистами Винковича Н., Стойковича В. и Микулича Д. При этом расчёты были проведены для различных грунтов, которые в зависимости от удельного сопротивления резанью поделены на 4 категории: песчаная глина, гравий; плотная глина, уголь; твердая глина с гравием; средний сланец, мел, мягкий гипсовый камень. Полученные данные стали фактически массивом исходной информации, которая вместе с извест-

ными физическими зависимостями позволили сформировать массив расчётных формул, которые позволяют рассчитать крутящий момент на валу бойкового трала, мощность приводящего бойковый трал мотора, а также мощность силовой установки робототехнического средства, и тем самым решить научную проблему, поставленную в начале исследования.

Робототехника; робототехническое средство; бойковый трал; сопротивление разрушению грунта; мощность привода; крутящий момент.

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

THE PROCEDURE FOR CALCULATING THE DRIVE OF THE WORKING BODY OF A ROBOTIC DEVICE FOR HUMANITARIAN DEMINING

The aim of the study is to develop a methodology that allows us to calculate the main parameters characterizing the ability of a robotic vehicle equipped with a striker minesweeper to perform humanitarian demining operations. For this purpose, within the framework of this work, tasks were solved such as calculating the torque on the shaft of the striker trawl, determining the power of the motor driving the striker trawl, and calculating the power of the power plant of a robotic vehicle. During the research, the experience of creating and the main parameters of foreign mine clearance equipment with firing minesweepers were analyzed – the Hydrema 910 MCV crew mine clearance vehicle, the MV-4 robotic mine clearance vehicle, the Uran-6 remote-controlled mine clearance vehicle, and the MT-2 remote-controlled mine trawl. The main features of the working body of the considered machines, namely the firing minesweeper, were also analyzed. The developed methodology is based on a method for calculating the resistance force of soil destruction and an explosive object when exposed to a bike, based on the theory of interaction of working bodies of earthmoving machines, developed by academician N.G. Dombrovsky. Also, during the development of this technique, the results of work on the calculation of the design of the striker trawl were used by Croatian specialists Vinkovic N., Stojkovic V. and Mikulic D. At the same time, calculations were carried out for various soils, which, depending on the resistivity of cutting, are divided into 4 categories: sandy clay, gravel; dense clay, coal; hard clay with gravel; medium slate, chalk, soft gypsum stone. The obtained data actually became an array of initial information, which, together with known physical dependencies, allowed us to form an array of calculation formulas that allow us to calculate the torque on the shaft of the striker trawl, the power of the motor driving the striker trawl, as well as the power of the power plant of the robotic means, and thereby solve the scientific problem posed at the beginning of the study.

Robotics; robotic equipment; striker trawl; resistance to soil destruction; drive power; torque.

Введение. Опыт решения задач, возникающих в связи с проведением специальной военной операции, позволяет сделать вывод о необходимости оснащения формируемый МЧС России высокоэффективными средствами разминирования, предназначенных для проведения гуманитарных операций. Их главными особенностями является возможность проведения сплошного разминирования; повышенные требования по обеспечению безопасности расчетов, более жесткие требования по показателю «эффективность-стоимость».

Попытки коммерческих структур создать такие средства в инициативном порядке показал, что в ходе испытаний выявлялось несоответствие применяемых технических решений, тактико-техническим требованиям, предъявляемым к средствам гуманитарного разминирования. Что показало, что методики расчета их основных показателей требуют переработки.

Постановка задачи исследования. Анализ применения робототехники спасательными воинскими формированиями МЧС России показывает, что в последнее десятилетие подавляющее количество работ при ликвидации ЧС с применением робототехнических средств осуществляется при гуманитарном разминировании [1–3]. Это вызвано, в первую очередь, интенсификацией вооруженных конфликтов, что приводит к загрязнению больших территорий минами, неразорвавшимися артиллерийскими и авиационными боеприпасами, другими взрывоопасными предметами (ВОП) [4–6].

В настоящее время в МЧС России для площадного разминирования [7–10] широкое применение получили как экипажные машины, такие как Hydrema 910 MCV (рис. 1) [11], так и робототехнические средства специального назначения MV-4 (рис. 2) [12, 13],

ДУМ-Р «Уран-6» (рис. 3). Российской компанией ООО «ДСТ-Урал» разработан и проходит приемочные испытания дистанционно-управляемый минный трал МТ-2 на шасси промышленного погрузчика (рис. 4).



Рис. 1. Экипажная машина разминирования Hydreta 910 MCV



Рис. 2. Робототехническое средство MV-4



Рис. 3. Дистанционно-управляемая машина разминирования ДУМ-Р «Уран-6»



Рис. 4. Дистанционно-управляемый минный трал МТ-2

Все представленные машины, как экипажные, так и робототехнические средства гуманитарного разминирования, оборудованы бойковым минным тралом [14–17].

Основным рабочим органом бойкового трала (рис. 5) является бойковый вал 1 с бойками 2, при вращении которых происходит разрушение на заданную глубину поверхностного слоя грунта вместе с установленными в нем минами или другими ВОП [18–20], которые могут находиться и на поверхности грунта в траве.

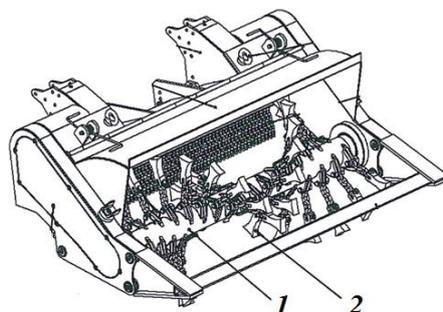


Рис. 5. Бойковый минный трал (на примере ДУМ-Р)

На всех машинах привод бойкового вала осуществляется гидромоторами через цепную передачу или редуктор [21]. По взглядам ведущих ученых и конструкторов в области робототехники, в дальнейшем возможен переход полностью на электрический привод не только в трансмиссии РТС, но и в рабочих органах робототехники. Тяговый расчет электромеханической трансмиссии РТС приведен в ряде учебных пособий и научно-технических статьях [22, 23]. Расчету конструкции бойкового трала посвящена работа хорватских специалистов Винковича Н., Стойковича В. и Микулича Д. [24]. С учетом положений, изложенных в работе [24] и опираясь на теорию взаимодействия рабочих органов землеройных машин, разработанную академиком Н.Г. Домбровским [25, 26], возможен расчет требуемой мощности и крутящего момента двигателя для привода бойкового трала.

Силы, возникающие при взаимодействии бойка трала с грунтом и подведенный крутящий момент к валу трала представлены на рисунке 6. На боек постоянно действует центробежная сила P_c , при взаимодействии с грунтом боек разрушает грунт с силой P , которая может быть разложена по осям OX , OY и OZ (силы P_x , P_y и P_z соответственно). Грунт сопротивляется разрушению с силой R . Бойковый вал вращается с угловой скоростью ω , к валу подведен крутящий момент $M_{\rho\omega}$.

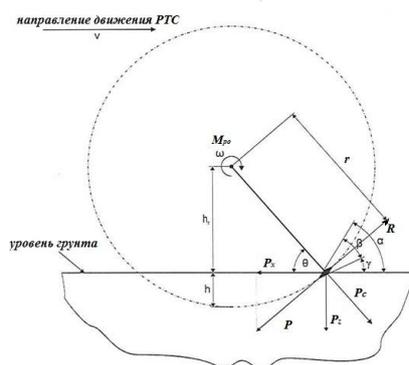


Рис. 6. Силы и моменты при взаимодействии бойкового трала с грунтом

Подзадача определения крутящего момента на валу трала. Сила разрушения грунта P является силой инерции бойка при его замедлении в грунте и определяется по формуле

$$P = m \times j, \quad (1)$$

где m – масса бойка и части цепи (для расчета можно принять 0,33 от массы цепи), кг;
 j – линейное замедление бойка при разрушении грунта и ВОП, м/с².

В свою очередь линейное замедление бойка можно определить через угловое замедление по формуле

$$j = r \times \varepsilon, \quad (2)$$

где r – радиус окружности, описываемой бойком при вращении, м;
 ε – угловое замедление бойка при разрушении грунта и ВОП, 1/с².

Для гарантированного разрушения грунта, сила инерции бойка P должна быть не менее силы сопротивления грунта разрушению, что является реакцией грунта R .

Рассмотрим взаимодействие бойка с грунтом. По методике Н.Г. Домбровского [25, 26], силы, возникающие на рабочем органе землеройной машины можно представить рис. 7.

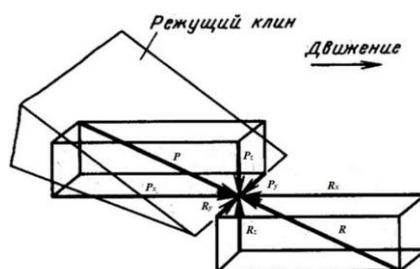


Рис. 7. Силы на бойке при взаимодействии с грунтом

Сила сопротивления разрушению грунта, она же сила реакции грунта R , может быть разложена на касательную составляющую R_x (по оси OX), боковую составляющую R_y (по оси OY) и нормальную составляющую R_z (по оси OZ).

В свою очередь касательная составляющая реакции грунта R_x будет определяться как сумма сил [18, 19]

$$R_x = R_p + R_{тр} + R_{пр} + R_{зап}, \quad (3)$$

где R_p – сила сопротивления резанию грунта, Н;

$R_{тр}$ – сила трения бойков о грунт, Н;

$R_{пр}$ – сила сопротивления призмы волочения грунта, Н;

$R_{зап}$ – сила сопротивления при наполнении рабочего органа грунтом, Н.

Сила сопротивления резанию грунта R_p определяется по формуле [25, 26],

$$R_p = k_1 \times h \times b, \quad (4)$$

где k_1 – удельное сопротивление грунта резанию, Па;

h – глубина резания грунта, м;

b – ширина резания грунта (ширина траления), м.

Удельное сопротивление грунта резанию приведено в табл. 1 [25, 26]/

Таблица 1

Значение k_1 для различных категорий грунта

Удельное сопротивление грунта резанию, Па	Категория грунта
25000	I (песчаная глина, гравий)
95000	II (плотная глина, уголь)
175000	III (твердая глина с гравием)
320000	IV (средний сланец, мел, мягкий гипсовый камень)

Сила трения бойков о грунт $R_{тр}$ определяется по формуле

$$R_{тр} = \mu \times P_c \times \cos(\gamma + \beta/2), \quad (5)$$

где μ – коэффициент трения при движении бойка, ед.

Углы γ и β представлены на рис. 6.

Силы сопротивления призмы волочения грунта $R_{пр}$ и сопротивления при наполнении рабочего органа грунтом $R_{зап}$ определяются по формуле [18, 19]

$$R_{пр} + R_{зап} = (V_{пр} + q \times K_n) \times e, \quad (6)$$

где $V_{пр}$ – объем призмы волочения, м³;

q – вместимость рабочего органа, м³;

K_n – коэффициент наполнения, ед;

e – удельное сопротивление перемещению призмы грунта при заполнении (зависит от вида рабочего органа (бойков)), Н/м³.

Указанные в формуле (6) величины зависят от формы бойка. Конструкции бойков представлены на рис. 8 [20, 21].

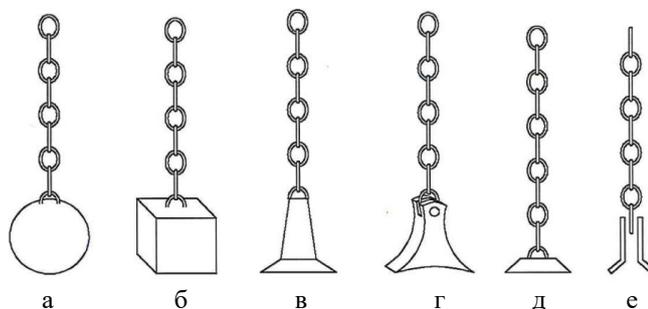


Рис. 8. Формы бойков

Нетрудно видеть, что силы $R_{пр}$ и $R_{зап}$ чаще будут возникать при применении бойков формы а) и б), однако такие формы бойков практически не применяются. В современных конструкциях бойковых тралов получили распространение бойки с формами в) и г), для которых силы $R_{пр}$ и $R_{зап}$ будут незначительными и при расчете ими можно пренебречь. Бойки с формами д) и е) не получили распространения в силу их недостаточной массы.

Нормальная составляющая R_z реакции грунта определяется по формуле [25, 26]

$$R_z = f \times R_x, \quad (7)$$

где f – коэффициент, зависящий от однородности и прочности грунта, заднего угла резания, степени затупления, размера и формы износа задних граней режущего инструмента (для грунтов III–IV категории – 0,15...0,3; для скальных и мерзлых грунтов – 0,3...0,6) [6, 7].

Боковая составляющая R_y рассчитывается по формуле [18, 19]

$$R_y = \psi \times R_x, \quad (8)$$

где ψ – коэффициент, зависящий от однородности и прочности грунта, формы режущего периметра рабочего органа и его ориентации относительно забоя (0,1...0,3) [25, 26].

Учитывая, что траление производится, как правило, при прямолинейном движении РТС, боковую составляющую реакции грунта можно не учитывать. Однако при расчете бойкового трала, позволяющего траление при движении по криволинейной траектории, эту силу необходимо определять [27].

Таким образом, сила разрушения грунта P , с которой боек воздействует на грунт, должна быть не менее силы реакции грунта R , т.е. $P \geq R$.

Тогда крутящий момент $M_{ро}$, подводимый от двигателя рабочего органа к валу бойкового трала, определяется по формуле [17]

$$M_{ро} = M_{сопр} + M_{инерц} + M_{раз}, \quad (9)$$

где $M_{\text{сопр}}$ – момент сопротивления в подшипниках вала и возможного эксцентриситета вала с бойками, Н·м;

$M_{\text{инерц}}$ – момент инерции вращающихся масс бойкового трала, Н·м;

$M_{\text{раз}}$ – момент сопротивления разрушению грунта и ВОП, Н·м.

Подзадача определения мощностей приводящего двигателя рабочего органа и силовой установки. В свою очередь момент сопротивления в подшипниках вала и возможного эксцентриситета вала с бойками $M_{\text{сопр}}$ определяется по формуле (5)

$$M_{\text{сопр}} = m_{\text{ро}} \times g \times l_{\text{смещ}} + P_c \times \mu_{\text{подш}} \times r_{\text{ср}}, \quad (10)$$

где $m_{\text{ро}}$ – масса бойкового вала с бойками, кг;

g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с²;

$l_{\text{смещ}}$ – эксцентриситет бойкового вала, м;

$\mu_{\text{подш}}$ – коэффициент трения качения в подшипниках вала, ед;

$r_{\text{ср}}$ – средний радиус вращения центра масс бойка с цепью, м. При расчетах можно принять равной $0,66 \times r$.

Момент инерции вращающихся масс бойкового трала $M_{\text{инерц}}$ будет определяться по формуле [17]

$$M_{\text{инерц}} = J_{\text{ро}} \times \varepsilon + \sum m_i \times j \times r_i, \quad (11)$$

где $J_{\text{ро}}$ – момент инерции вала, цепей и бойков, кг·м²;

m_i и r_i – масса и радиус вращения центра масс i -го бойка с цепью, кг, м.

Наибольший вклад в величину подводимого к валу крутящему моменту $M_{\text{ро}}$ вносит момент сопротивления разрушению грунта и ВОП $M_{\text{раз}}$, который определяется по формуле

$$M_{\text{раз}} = R \times r. \quad (12)$$

Зная требуемую угловую скорость вращения вала (в современных бойковых тралах составляет от 600 до 1000 об/мин) можно определить необходимую мощность приводного двигателя (или двигателей) рабочего оборудования $N_{\text{ро}}$ робототехнических средств для гуманитарного разминирования. Мощность $N_{\text{ро}}$ определяется по формуле

$$N_{\text{ро}} = M_{\text{ро}} \times \omega. \quad (13)$$

Суммарная мощность силовой установки робототехнического средства $N_{\text{рТС}}$ будет определяться по формуле

$$N_{\text{рТС}} = N_{\text{ро}} + N_{\text{дв}}, \quad (14)$$

где $N_{\text{дв}}$ – мощность, необходимая для движения РТС, Вт. Порядок расчета приведен в работе [28].

Заключение. Опыт проведения в МЧС России опытной эксплуатации самоходного гусеничного комплекса для проведения разминирования на дистанционном управлении МТ-2 (производитель ООО «ДСТ-Урал») и робототехнического комплекса гуманитарного разминирования «Шмель» (производитель АО «Ковровский электромеханический завод») показал, что основным недостатком представленных производителями образцов техники являлась недостаточная мощность силовой установки. Вследствие этого на испытаниях машины не обеспечивали траление грунта на необходимую глубину, качество траления оставалось на низком уровне. Замена силовой установки на МТ-2 на более мощную позволило достичь требуемой эффективности траления, машина успешно прошла все испытания и была принята на снабжение МЧС России. Таким образом, использование производителями робототехнических средств гуманитарного разминирования приведенной в статье методики расчета, позволяющей определить общую мощность силовой установки робототехнического средства, предназначенного для гуманитарного разминирования, позволит им избежать ошибок при их проектировании, экономит время и финансы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данилов К.Ю., Сероштанов А.В., Лопатин Д.С. Опыт применения наземных робототехнических комплексов в ФГКУ ЦСООР «Лидер» // Применение робототехнических комплексов специального назначения: Сб. трудов XXVIII Международной научно-практической конференции. – 2018. – С. 20-24.
2. Полевой Е.В., Найденов Д.С., Гудошников А.А., Лопатин Д.С. Анализ современного состояния группировки робототехнических комплексов МЧС России // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2021. – № 4 (51). – С. 43-53.
3. Спицин Д.В., Лагутина А.В. Перспективы применения робототехнических комплексов при проведении работ, связанных с поиском и обезвреживанием взрывоопасных предметов // III Научно-практическая конференция по развитию робототехники в области обеспечения безопасности жизнедеятельности "RoboEmercom": Сб. материалов конференции. – М., 2023. – С. 195-198.
4. Habib M., Baudoin Y. Mechanical mine clearance: Development, applicability and difficulties. – Published, 2011. – Engineering, Environmental Science.
5. Habib M. Humanitarian demining: Difficulties, needs and the prospect of technology // Published in IEEE International Conference. 1 August 2008. – Engineering, Environmental Science.
6. Васильев В.Л. Гуманитарное разминирование основные проблемы и уроки // Гуманитарные операции при чрезвычайных ситуациях и в вооруженных конфликтах: Седьмая всероссийская научно-практическая конференция: Доклады и выступления. Центр стратегических исследований гражданской защиты МЧС России. – 2002. – С. 129-141.
7. Мошков В.Б., Баранник А.Ю. Перспективы развития системы робототехники МЧС России в интересах повышения эффективности ведения аварийно-спасательных работ // Технологии гражданской безопасности. Спецвыпуск. – 2021. – С. 124-126.
8. Алёхин М.В., Петросян А.Е., Шаховцев К.В. Мобильные платформы для разминирования // Актуальные вопросы и основы международного сотрудничества в сфере высоких технологий: Сб. статей по итогам Международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 4-5.
9. Назарова М.С., Захаров А.Е. Робототехнические средства разминирования и расснаряжения взрывных устройств // Образование. Культура. Общество: Сб. статей LXXI Международной научной конференции. – СПб., 2023. – С. 60-64.
10. Белов А.А., Меньк А.Р., Покрышкин А.Б. Развитие отечественных минных тралов. Современные средства разминирования // Наука ЮУрГУ: Матер. 71-й научной конференции. Южно-Уральский государственный университет. – 2019. – С. 546-555.
11. Trar Theimer. Summary Report 910 Mechanical Clearance Device James Madison University.
12. YOUR SOLUTION FOR DEMINING & COUNTER-IED docs.tuyap.online:FDOCS/23577.pdf.
13. Jane's Military Vehicles and Logistics 2007-2008. – 28th ed., Coulsdon, Surrey, UK.
14. Essers M.S., Vaneker T.N.J. Developing Concepts for Improved Efficiency of Robot Work Preparation // Proceedings CIRP. – 2013. – Vol. 7. – P. 515-520. – DOI.org/10.1016/j.procir.2013.06.025.
15. Beloglazov D., Pereverzev V., Soloviev V., Pshikhopov V., Morozov R. Method of Formation of Quantitative Indicators of Complexity of the Environment by a Group of Autonomous Mobile Robots // Journal of Robotics. – 2020. – No. 3. – P. 1-14. – DOI: 10.1155/2020/6874291.
16. Altshuler H., Wagner I.V., Bruckstein F.M. With caution-decreasing a swarm robotics' efficiency by imprudently enhancing the robots' capabilities // IEEE Xplore Conference: Autonomous Robots and Agents. – 2009. – DOI: 10.1109/ICARA.2000.4804014.
17. Elshamy W. Adaptive Control in Swarm Robotics Computer Science. – 2021. – <https://www.semanticscholar.org/paper/Adaptive-Control-in-Swarm-Robotics-Elshamy/b112317012d4380a0311276936ddefd7c8cddd16>.
18. Tomokie Burton, Kushwaha R. Development of a Mechanical Device for Landmine Neutralization. – Published, 2006. – Engineering, Environmental Science.
19. Griffiths Alexander, Kaminsky Leonard. Mechanical Application in Demining: Modernising Clearance Methods. – Published, 2003. – Engineering Journal of Conventional Weapons Destruction.
20. Rubinstein D., Wolf D. De-mining device based on chain impact. – Published, 1999. – Engineering Transactions of the ASABE.
21. Калининченко В.П., Зармаев А.А. Устройство для разминирования территорий принудительным подрывом мин в гуманитарных целях // Вестник Академии наук Чеченской Республики. – 2012. – № 1 (16). – С. 65-75.
22. Наумов В.Н., Машков К.Ю., Носков С.С., Борисов А.В., Васильев В.А. Выбор и оценка системы энергообеспечения мобильных роботов: учеб. пособие. – Новогорск: АГЗ МЧС России, 2003. – 52 с.
23. Носков С.С., Гудошников А.А., Рыбина А.В. Расчет комбинированного источника электрической энергии мобильного робототехнического средства специального назначения // Применение робототехнических комплексов специального назначения: Сб. трудов XXXIII Международной научно-практической конференции. – Химки, 2023. – С. 49-55.

24. *Vinkovic N., Stojkovic V., Mikulic D.* Design of Flail for Soil Treatment // 5th DAAAM International Conference on Advanced Technologies for Developing Countries. – University of Rijeka, Rijeka, 2006.
25. *Домбровский Н.Г. и др.* Строительные машины: учебник для вузов по спец. «Строит. и дор. машины и оборудование»: В 2 ч. Ч. 1. – М.: Машиностроение, 1985. – 391 с.
26. *Домбровский Н.Г. и др.* Строительные машины: учебник для вузов по спец. «Строит. и дор. машины и оборудование»: В 2 ч. Ч. 2. – М.: Высшая школа, 1985. – 224 с.
27. YASA P400 R Series. – URL: <https://www.yasa.com/products/yasa-p400/> (дата обращения: 18.11.2023).
28. *Green W.E.* The case for the flail: Mechanical Landmine Clearance for the Humanitarian Application A Manufacturer's View // Engineering, Political Science Journal of Conventional Weapons Destruction. – 1999.

REFERENCES

1. *Danilov K.Yu., Ceroshtanov A.V., Lopatin D.S.* Opyt primeneniya nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksov v FGKU TSSOOR «Lider» [Experience with the use of ground robotic systems in FGKU ZCOOR the "LEADER"], *Primenenie robototekhnicheskikh kompleksov spetsial'nogo naznacheniya: Sb. trudov KHKHVIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [The use of special-purpose robotic systems. Proceedings of the XXVIII International Scientific and Practical Conference], 2018, pp. 20-24.
2. *Polevoy E.V., Naydenov D.S., Gudoshnikov A.A., Lopatin D.S.* Analiz sovremennogo sostoyaniya gruppировки robototekhnicheskikh kompleksov MCHS Rossii [Analysis of the current state of the group of robotic complexes of the Emercom of Russia], *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoй zashchity* [Scientific and educational problems of civil protection], 2021, No. 4 (51), pp. 43-53.
3. *Spitsin D.V., Lagutina A.V.* Perspektivy primeneniya robototekhnicheskikh kompleksov pri provedenii работ, svyazannykh s poiskom i obezvrezhivaniem vzryvoopasnykh predmetov [Prospects for the use of robotic complexes in carrying out work related to the search and neutralization of explosive objects], *III Nauchno-prakticheskaya konferentsiya po razvitiyu robototekhniki v oblasti obespecheniya bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti "RoboEmercom": Sb. materialov konferentsii* [III Scientific and practical Conference on the development of robotics in the field of life safety "RoboEmercom": Collection of conference materials]. Moscow, 2023, pp. 195-198.
4. *Habib M., Baudoin Y.* Mechanical mine clearance: Development, applicability and difficulties. Published, 2011. Engineering, Environmental Science.
5. *Habib M.* Humanitarian demining: Difficulties, needs and the prospect of technology, *Published in IEEE International Conference. 1 August 2008.* Engineering, Environmental Science.
6. *Vasil'ev V.L.* Gumanitarnoe razminirovanie osnovnye problemy i uroki [Humanitarian demining main problems and lessons], *Gumanitarnye operatsii pri chrezvychaynykh situatsiyakh i v vooruzhennykh konfliktakh: Sed'maya vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya: Doklady i vystupleniya. Tsentr strategicheskikh issledovaniy grazhdanskoй zashchity MChS Rossii* [Humanitarian operations in emergency situations and in armed conflicts. The seventh All-Russian Scientific and Practical conference: Reports and speeches. The Center for Strategic Studies of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Russia], 2002, pp. 129-141.
7. *Moshkov V.B., Barannik A.Yu.* Perspektivy razvitiya sistemy robototekhniki MChS Rossii v interesakh povysheniya effektivnosti vedeniya avariyno-spatel'nykh работ [Prospects for the development of the robotics system of the Ministry of Emergency Situations of Russia in the interests of improving the efficiency of emergency rescue operations], *Tekhnologii grazhdanskoй bezopasnosti. Spetsvyпуск* [Technologies of civil safety. Special issue], 2021, pp. 124-126.
8. *Alekhin M.V., Petrosyan A.E., Shakhovtsev K.V.* Mobil'nye platformy dlya razminirovaniya [Mobile platforms for mine clearance], *Aktual'nye voprosy i osnovy mezhdunarodnogo sotrudnichestva v sfere vysokikh tekhnologiy: Sb. statey po itogam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Current issues and fundamentals of international cooperation in the field of high technologies: Collection of articles on the results of the International Scientific and Practical Conference – 2017], 2017, pp. 4-5.
9. *Nazarova M.S., Zakharov A.E.* Robototekhnicheskie sredstva razminirovaniya i rassnaryazheniya vzryvnykh ustroystv [Robotic means of mine clearance and discharge of explosive devices], *Obrazovanie. Kul'tura. Obshchestvo: Sb. statey LXXI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Education. Culture. Society. Collection of articles of the LXXI International Scientific Conference]. Saint Petersburg, 2023, pp. 60-64.

10. Belov A.A., Men'k A.R., Pokryshkin A.B. Razvitiye otechestvennykh minnykh tralov. Sovremennye sredstva razminirovaniya [Development of domestic minesweepers. modern means of mine clearance], *Nauka YuUrGU: Mater. 71-y nauchnoy konferentsii. Yuzhno-Ural'skiy gosudarstvennyy universitet* [SUSU Science. materials of the 71st scientific conference. South Ural State University], 2019, pp. 546-555.
11. *Trar Theimer*. Summary Report 910 Mechanical Clearance Device James Madison University.
12. YOUR SOLUTION FOR DEMINING & COUNTER-IED docs.tuyap.online:FDOCS/23577.pdf.
13. Jane's Military Vehicles and Logistics 2007-2008. 28th ed., Coulsdon, Surrey, UK.
14. Essers M.S., Vaneker T.N.J. Developing Concepts for Improved Efficiency of Robot Work Preparation, *Proceedings CIRP*, 2013, Vol. 7, pp. 515-520. DOI.org/10.1016/j.procir.2013.06.025.
15. Beloglazov D., Pereverzev V., Soloviev V., Pshikhopov V., Morozov R. Method of Formation of Quantitative Indicators of Complexity of the Environment by a Group of Autonomous Mobile Robots, *Journal of Robotics*, 2020, No. 3, pp. 1-14. DOI: 10.1155/2020/6874291.
16. Altshuler H., Wagner I.V., Bruckstein F.M. With caution-decreasing a swarm robotics' efficiency by imprudently enhancing the robots' capabilities, *IEEE Xplore Conference: Autonomous Robots and Agents*, 2009. DOI: 10.1109/ICARA.2000.4804014.
17. Elshamy W. Adaptive Control in Swarm Robotics Computer Science, 2021. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Adaptive-Control-in-Swarm-Robotics-Elshamy/b112317012d4380a0311276936ddefd7c8cddd16>.
18. Tomokie Burton, Kushwaha R. Development of a Mechanical Device for Landmine Neutralization. Published, 2006. Engineering, Environmental Science.
19. Griffiths Alexander, Kaminsky Leonard. Mechanical Application in Demining: Modernising Clearance Methods. Published, 2003. Engineering Journal of Conventional Weapons Destruction.
20. Rubinstein D., Wolf D. De-mining device based on chain impact. Published, 1999. Engineering Transactions of the ASABE.
21. Kalinichenko V.P., Zarmaev A.A. Ustroystvo dlya razminirovaniya territoriy prinuditel'nym podryvom min v gumanitarnykh tselyakh [A device for demining territories by forcibly detonating mines for humanitarian purposes], *Vestnik Akademii nauk Chechenskoy Respubliki* [Bulletin of the Academy of Sciences of the Chechen Republic], 2012, No. 1 (16), pp. 65-75.
22. Naumov V.N., Mashkov K.YU., Noskov S.S., Borisov A.V., Vas'kov V.A. Vybora i otsenka sistemy energoobespecheniya mobil'nykh robotov: ucheb. posobie [Selection and evaluation of the energy supply system for mobile robots: a textbook]. Novogorsk: AGZ MCHS Rossii, 2003, 52 p.
23. Noskov S.S., Gudoshnikov A.A., Rybina A.V. Raschet kombinirovannogo istochnika elektricheskoy energii mobil'nogo robototekhnicheskogo sredstva spetsial'nogo naznacheniya [Calculation of a combined electric power source of a mobile robotic device for special purposes], *Primenenie robototekhnicheskikh kompleksov spetsial'nogo naznacheniya: Sb. trudov XXXIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Application of robotic complexes for special purposes. Proceedings of the XXXIII International Scientific and Practical Conference]. Khimki, 2023, pp. 49-55.
24. Vinkovic N., Stojkovic V., Mikulic D. Design of Flail for Soil Treatment, *5th DAAAM International Conference on Advanced Technologies for Developing Countries*. University of Rijeka, Rijeka, 2006.
25. Dombrovskiy N.G. *i dr.* Stroitel'nye mashiny: uchebnyk dlya vu ov po spets. «Stroit. i dor. mashiny i oborudovanie» [Construction machines: textbook for universities on the specialty "Builds furniture and road machinery and equipment"]: In 2 part. Part 1. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 391 p.
26. Dombrovskiy N.G. *i dr.* Stroitel'nye mashiny: uchebnyk dlya vu ov po spets. «Stroit. i dor. mashiny i oborudovanie» [Construction machines: textbook for universities specializing in "Construction and road machinery and equipment"]: In 2 part. Part 2. Moscow: Vysshaya shkola, 1985, 224 p.
27. YASA P400 R Series. Available at: <https://www.yasa.com/products/yasa-p400/> (accessed 18 November 2023).
28. Green W.E. The case for the flail: Mechanical Landmine Clearance for the Humanitarian Application A Manufacturer's View, *Engineering, Political Science Journal of Conventional Weapons Destruction*, 1999.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Х. Пшихопов.

Носков Сергей Семенович – Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр науки и высоких технологий); e-mail: noskov@vniigochs.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89175963163; к.т.н.; доцент; начальник научно-исследовательского центра развития технических средств и технологий.

Баранник Александр Юрьевич – e-mail: auba@yandex.ru; тел.: 89166951214; к.т.н.; с.н.с.; ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра развития технических средств и технологий.

Лебедев Андрей Александрович – e-mail: lebedevaa@vniigochs.ru; тел.: 89055265177; к.в.н.; старший научный сотрудник научно-исследовательского центра развития технических средств и технологий.

Лагутина Анна Викторовна – e-mail: anya-lagutina@yandex.ru; тел.: 89057118834; старший научный сотрудник 6 научно-исследовательского центра «Развития технических средств и технологий».

Noskov Sergey Semenovich – All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defence and Emergencies of the EMERCOM of Russia (Federal Science and High Technology Center); e-mail: noskov@vniigochs.ru; Moscow, Russia; phone: +79175963163; cand. of eng. sc.; assistant professor; head of the Research Center for the Development of Technical Means and Technologies.

Barannik Aleksandr Yurjevich – e-mail: auba@yandex.ru; phone: +79166951214; cand. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher of the Research Center for the Development of Technical Means and Technologies.

Lebedev Andrej Aleksandrovich – e-mail: lebedevaa@vniigochs.ru; phone: +79055265177; cand. of mil. sc.; senior researcher of the Research Center for the Development of Technical Means and Technologies.

Lagutina Anna Viktorovna – e-mail: anya-lagutina@yandex.ru; phone: +790571188-34; senior researcher of the 6th Research Center Development of Technical Means and Technologies.

Раздел II. Алгоритмы обработки информации

УДК 004.5

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-55-64

Л.К. Бабенко, В.С. Стародубцев

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ КРИПТОАНАЛИЗА ГОМОМОРФНЫХ ШИФРОВ, ОСНОВАННЫХ НА ЗАДАЧЕ ФАКТОРИЗАЦИИ ЧИСЕЛ

Рассматриваются гомоморфные криптосистемы, основанные на задаче факторизации чисел. В сравнении с криптосистемами типа Джендри их реализация менее трудоемка, но при этом требуется тщательная проверка стойкости. В качестве примера гомоморфной криптосистемы, основанной на задаче факторизации чисел рассматривается симметричная криптосистема Доминго-Феррера. Для этой криптосистемы представлены процессы генерации ключа, шифрования, расшифрования и выполнения гомоморфных операций. Приводится описание атаки с известным открытым текстом на криптосистему Доминго-Феррера, а также демонстрационный пример такой атаки с небольшим значением степени полиномов представления шифртекстов. Для разрабатываемой архитектуры системы представляются основные требования и общая схема с кратким описанием области ответственности отдельных модулей и их взаимосвязями. Целью исследования является выявление подходов, техник и тактик, общих для конкретных методов криптоанализа гомоморфных криптосистем, основанных на задаче факторизации чисел, и создание такой архитектуры системы, которая бы позволила упростить криптоанализ путем предоставления криптоаналитику удобного окружения и инструментария для реализации собственных методов криптоанализа. Основным результатом настоящей работы является архитектура системы криптоанализа, позволяющая провести комплексный анализ уязвимостей для различных атак и оценить уровень криптостойкости рассматриваемого шифра, основанного на задаче факторизации чисел, а также обоснование применения такой архитектуры для анализа гомоморфных шифров на примере криптосистемы Доминго-Феррера. Реализация системы криптоанализа по предлагаемой архитектуре поможет исследователям и специалистам по криптографии более детально изучить возможные слабые места в гомоморфных шифрах, основанных на задаче факторизации чисел и разработать соответствующие меры для укрепления их стойкости. Таким образом, проводимое исследование имеет важное значение для развития криптографических систем, основанных на задаче факторизации чисел, и предоставляет новый инструментарий для криптоаналитиков в области анализа гомоморфных криптосистем. Полученные результаты могут быть использованы для повышения уровня стойкости существующих шифров и разработки новых методов криптографии.

Информационная безопасность; конфиденциальная информация; гомоморфное шифрование; криптосистема Доминго-Феррера; криптоанализ; архитектура системы криптоанализа.

L.K. Babenko, V.S. Starodubtsev

FEATURES OF THE IMPLEMENTATION OF THE CRYPTANALYSIS SYSTEM OF HOMOMORPHIC CIPHERS BASED ON THE PROBLEM OF FACTORIZATION OF NUMBERS

This article discusses homomorphic cryptosystems based on the problem of factorization of numbers. In comparison with Gentry-type cryptosystems, their implementation is less laborious, but it requires careful verification of durability. The Domingo-Ferrer symmetric cryptosystem is considered as an example of a homomorphic cryptosystem based on the number factorization problem. For this cryptosystem, the processes of key generation, encryption, decryption, and performing homomorphic operations are presented. A description of an attack with a known plaintext on the Domingo-Ferrer cryptosystem is given, as

well as a demonstration example of such an attack with a small value of the degree of the polynomials of the ciphertext representation. For the system architecture under development, the basic requirements and a general scheme are presented with a brief description of the area of responsibility of individual modules and their interrelationships. The aim of the study is to identify approaches, techniques and tactics common to specific cryptanalysis methods of homomorphic cryptosystems based on the problem of factorization of numbers, and to create a system architecture that would simplify cryptanalysis by providing the cryptanalyst with a convenient environment and tools for implementing his own cryptanalysis methods. The main result of this work is the architecture of the cryptanalysis system, which allows for a comprehensive analysis of vulnerabilities for various attacks and to assess the level of cryptographic strength of the cipher in question, based on the problem of factorization of numbers, as well as the justification for the use of such an architecture for the analysis of homomorphic ciphers using the example of the Domingo-Ferrer cryptosystem. The implementation of a cryptanalysis system based on the proposed architecture will help researchers and cryptography specialists to study in more detail possible weaknesses in homomorphic ciphers based on the problem of factorization of numbers and develop appropriate measures to strengthen their durability. Thus, the ongoing research is important for the development of cryptographic systems based on the problem of factorization of numbers and provides new tools for cryptanalysts in the field of analysis of homomorphic cryptosystems. The results obtained can be used to increase the strength of existing ciphers and develop new cryptographic methods.

Information security; confidential information; homomorphic encryption; Domingo-Ferrer cryptosystem; cryptanalysis; architecture of the cryptanalysis system.

Введение. Гомоморфное шифрование является одной из важных техник в области криптографии, которая предоставляет возможность выполнять операции с зашифрованными данными без необходимости расшифровывать их [1]. Это особенно полезно в контексте облачных вычислений и обработки данных, где часто возникает необходимость в анализе и использовании конфиденциальной информации [2].

Гомоморфное шифрование активно развивается, поскольку существующие схемы обладают определенными ограничениями, сокращающими область их применения, и авторы либо пытаются усовершенствовать существующие схемы, либо предлагают новые. При этом не существует единой методологии для обоснования стойкости большинства гомоморфных шифров, и их криптоанализ представляет собой сложную задачу [3]. Для упрощения процедуры криптоанализа конкретных шифров можно некоторые особенности его проведения учесть при построении архитектуры системы криптоанализа, предоставляя криптоаналитику удобное окружение и инструментарий.

Постановка задачи. Впервые понятие гомоморфного шифрования было введено Рональдом Ривестом, Леонардом Адлеманом и Майклом Дертусосом в 1978 году, когда они предложили использовать созданный годом ранее алгоритм RSA для выполнения операции умножения над зашифрованными текстами без их расшифрования [4]. Однако, поскольку алгоритм RSA, а также ряд других алгоритмов, появившихся в то время, являлись частично гомоморфными (свойства гомоморфизма проявлялись относительно только одной операции – сложения или умножения), их применение в данной области было сильно ограничено [5].

В 2009 году произошел значительный прорыв в области развития полностью гомоморфного шифрования. Это связано с предложением Крейгом Джентри варианта полностью гомоморфной криптосистемы, основанной на криптографии на решетках [6]. На данный момент было разработано несколько десятков схем полностью гомоморфного шифрования, основанных на этой концепции. При шифровании криптосистемой типа Джентри в значение шифртекста внедряется небольшое случайное значение – шум, размер которого постоянно увеличивается при выполнении гомоморфных операций. Пример механизма добавления шума в криптосистемах BGV, BFV описан в [7] и [8] соответственно и приведен на рис. 1.

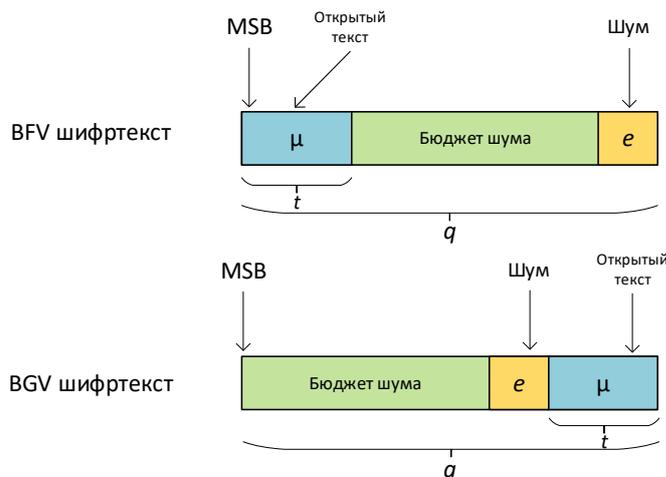


Рис. 1. Размещение шума в шифртекстах схем BFV, BGV

При выполнении сложения шум нарастает аддитивно, и не вызывает больших проблем, однако при умножении шум нарастает очень быстро и приводит к тому, что шифртекст больше не может быть расшифрован корректно [9] (бюджет шума был превышен и шумовые коэффициенты наложились на шифртекст).

Для решения данной проблемы был предложен специальный алгоритм самокоррекции [10], однако его применение существенно замедляет выполнение математических операций.

В качестве альтернативы различными авторами были предложены криптосистемы, являющиеся полностью гомоморфными, но при этом не использующими механизм добавления шума в шифртексты [11]. В этом случае процедуры гомоморфного умножения и сложения не приводят к существенному замедлению вычислений. Как правило, для обоснования стойкости таких систем криптоаналитику требуется применять разнообразные методы криптоанализа, что требует значительных временных затрат [12]. В этом случае разработка инструментария для проведения автоматического криптоанализа является актуальной задачей.

Описание криптосистемы Доминго-Феррера. Данная криптосистема была разработана в 1996 году и поддерживает выполнение гомоморфного сложения, вычитания и умножения. Система является симметричной (для шифрования и расшифрования используется один и тот же ключ) [13]. Количество последовательных выполнений гомоморфных операций в данной криптосистеме не ограничено, однако размеры результирующих шифртекстов увеличиваются (при умножении размер шифртекста растёт экспоненциально).

Для реализации криптосистемы Доминго-Феррера используется следующий набор значений [11]:

- 1) p и q – большие простые числа;
- 2) $n = p * q$ – труднофакторизуемое число;
- 3) d – степень полиномов представления шифртекстов.

Ключ в криптосистеме Доминго-Феррера представляется двумя числами – r_p и r_q , которые случайно выбираются из мультипликативных групп с соответствующим модулем: формулы (1) и (2) соответственно.

$$r_p \xleftarrow{Rand()} Z_p^*, \quad (1)$$

где Z_p^* – мультипликативная группа по модулю p .

$$r_q \xleftarrow{Rand()} Z_q^*, \quad (2)$$

где Z_q^* – мультипликативная группа по модулю q .

Для выполнения шифрования в криптосистеме Доминго-Феррера необходимо убедиться, что шифруемое сообщение $m \in Z_n$. После этого формируется набор случайных чисел a_1, \dots, a_d . Числа a_2, \dots, a_{d-1} заполняются по формуле (3).

$$a_i \xleftarrow{\text{Rand}()} Z_n, \quad (3)$$

где i – индекс в диапазоне $[2; d-1]$, Z_n – кольцо по модулю n .

Число a_d получает случайное ненулевое значение из Z_n по формуле (4).

$$a_d \xleftarrow{\text{Rand}()} Z_n \setminus \{0\}. \quad (4)$$

Числу a_1 присваивается значение в соответствии с формулой (5).

$$a_1 = m - \left(\sum_{i=2}^d a_i \right) \text{mod } n, \quad (5)$$

где m – шифруемое сообщение, n – модуль, определенный в параметрах схемы шифрования.

В результате представленных выше действий из набора чисел a формируется полином по формуле (6).

$$a(x) = a_d x^d + \dots + a_1 x. \quad (6)$$

Если суммировать все коэффициенты полученного полинома, результат должен быть равен m , как показано в формуле (7).

$$\sum_{i=1}^d a_i \text{mod } n = m. \quad (7)$$

После того, как сформирован полином открытого текста, его необходимо зашифровать на ключе (r_p, r_q) . Шифрование на первой части ключа r_p выполняется по формуле (8).

$$\pi(x) = (a_d \cdot r_p^d x^d + \dots + a_1 \cdot r_p x) \text{mod } p. \quad (8)$$

Таким образом формируется многочлен, каждый коэффициент которого представлен умножением коэффициента полинома $a(x)$ на первую часть ключа r_p , возведенную в ту степень, перед которой этот коэффициент установлен.

Шифрование на второй части ключа r_q выполняется аналогично шифрованию на первой части ключа и вычисляется по формуле (9).

$$\rho(x) = (a_d \cdot r_q^d x^d + \dots + a_1 \cdot r_q x) \text{mod } q. \quad (9)$$

Сформированная пара $(\pi(x), \rho(x))$ – зашифрованное сообщение m .

Для выполнения операции (сложение, вычитание, умножение) над двумя шифртекстами в криптосистеме Доминго-Феррера нужно применить эту операцию к полиномам шифртекстов, как показано в формуле (10).

$$C_3 = \{(\pi(x)_1 \circ \pi(x)_2), (\rho(x)_1 \circ \rho(x)_2)\}, \quad (10)$$

где C_3 – результирующий шифртекст, $(\pi(x), \rho(x))_1$ – первый шифртекст, $(\pi(x), \rho(x))_2$ – второй шифртекст.

Важно отметить, что в данном случае операция покоординатная, то есть умножаются (складываются) только те коэффициенты полиномов, у которых степени совпадают.

Для расшифрования в криптосистеме Доминго-Феррера предварительно необходимо для значений ключа (r_p, r_q) найти мультипликативные обратные (r_p^{-1}, r_q^{-1}) . Для расшифрования шифртекста $(\pi(x), \rho(x))$ нужно вычислить значения $A_p(x)$ и $A_q(x)$ по формулам (11) и (12) соответственно.

$$A_p(x) = (b_d \cdot (r_p^{-1})^d x^d + \dots + b_1 \cdot (r_p^{-1}) x) \text{mod } p, \quad (11)$$

где b – коэффициенты полинома $\pi(x)$ шифртекста.

$$A_q(x) = (b_d \cdot (r_q^{-1})^d x^d + \dots + b_1 \cdot (r_q^{-1}) x) \text{mod } q, \quad (12)$$

где b – коэффициенты полинома $\rho(x)$ шифртекста.

Далее для $A_p(x)$ вычисляется сумма всех коэффициентов по формуле (13).

$$M_p = \sum_{i=1}^d a_i \text{ mod } p, \quad (13)$$

где a_i – коэффициенты полинома $A_p(x)$.

Аналогично сумме M_p вычисляется сумма M_q по формуле (14).

$$M_q = \sum_{i=1}^d b_i \text{ mod } q, \quad (14)$$

где b_i – коэффициенты полинома $A_q(x)$.

После вычисления сумм M_p и M_q открытый текст исходного сообщения рассчитывается с помощью Китайской теоремы об остатках по формуле (15).

$$m = CRT(\{M_p, M_q\}, \{p, q\}), \quad (15)$$

где $CRT()$ – функция, использующая Китайскую теорему об остатках для поиска значения открытого текста m .

Атака с известным открытым текстом на криптосистему Доминго-Феррера. Условием успешности атаки является наличие $d + 1$ пар (открытый текст – шифртекст), сформированных на одном ключе [15].

Данная атака осуществляется в 2 этапа: на первом происходит раскрытие факторизации числа n , на втором – непосредственно поиск ключа.

Для раскрытия факторизации числа n необходимо сформировать матрицу по формуле (16).

$$A = \begin{pmatrix} m_1 & y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1d} \\ m_2 & y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{d+1} & y_{(d+1)1} & y_{(d+1)2} & \dots & y_{(d+1)d} \end{pmatrix}, \quad (16)$$

где m – открытый текст, y – коэффициент многочлена соответствующей степени первой части шифртекста $\pi(x)$.

Затем вычисляется факторизация числа n по формуле (17).

$$p = \text{НОД}(|A| \text{ mod } n, n); \quad q = \frac{n}{p}. \quad (17)$$

Для поиска первой части ключа r_p необходимо сформировать матрицу B , представляющую СЛАУ по формуле (18).

$$B \equiv \begin{pmatrix} -m_1 & y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1d} \\ -m_2 & y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -m_{d+1} & y_{(d+1)1} & y_{(d+1)2} & \dots & y_{(d+1)d} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \text{ mod } p, \quad (18)$$

где m – открытый текст, y – коэффициент многочлена соответствующей степени первой части шифртекста $\pi(x)$.

Затем необходимо найти решение t СЛАУ и вычислить значение первой части ключа r_p по формуле (19).

$$r_p = t^{-1} \text{ mod } p. \quad (19)$$

Чтобы вычислить вторую часть (r_q) ключа, нужно построить аналогичную СЛАУ с единственным отличием – y выбирается, как коэффициент многочлена соответствующей степени второй части шифртекста $\rho(x)$.

Выявленные характерные черты криптосистемы Доминго-Феррера. Для реализации криптосистемы Доминго-Феррера необходимо и достаточно определить её параметры (p, q, d) и произвести следующий набор действий:

1. Генерация ключа.
2. Шифрование.
3. Расшифрование.
4. Гомоморфные операции.

Для реализации других криптосистем, основанных на задаче факторизации чисел необходимо определить аналогичный набор действий и параметров, применительно к реализуемой криптосистеме.

Архитектура системы криптоанализа гомоморфных шифров, основанных на задаче факторизации чисел. При разработке архитектуры системы криптоанализа гомоморфных шифров, основанных на задаче факторизации чисел, учитывались следующие требования:

1. Универсальность – система должна позволять проводить анализ существующих гомоморфных шифров, основанных на задаче факторизации чисел.

2. Модульность и переносимость – система должна состоять из отдельных составных частей (модулей) с высокой связанностью и низким зацеплением.

3. Масштабируемость – система должна позволять добавлять реализации новых атак на гомоморфные шифры, основанные на задаче факторизации чисел.

Исходя из представленных требований, была сформирована архитектура системы, приведенная на рис. 2.

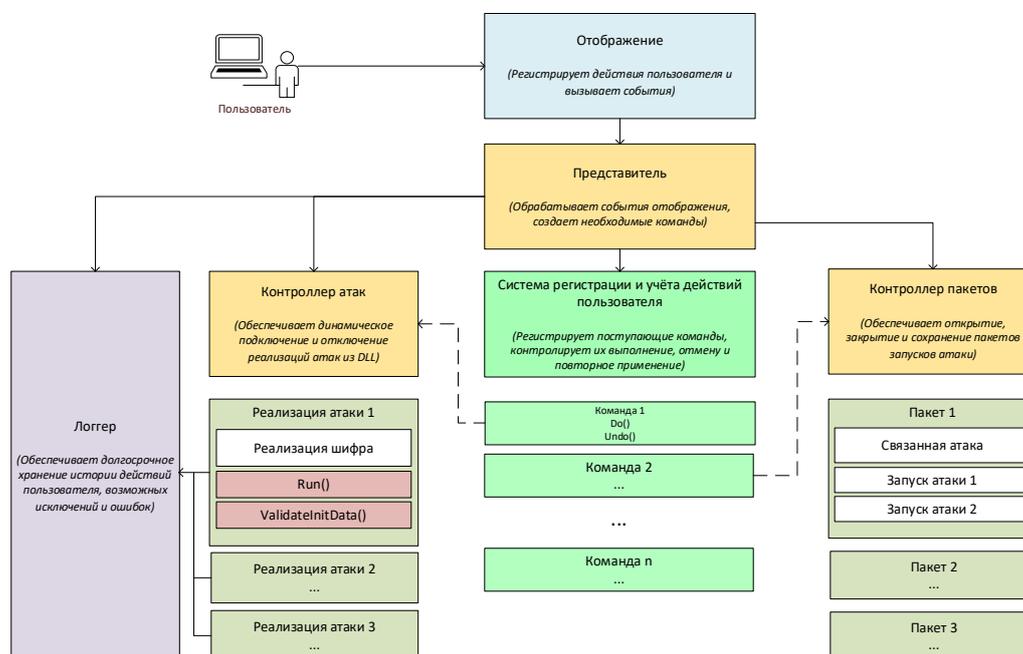


Рис. 2. Архитектура системы криптоанализа

Экземпляр системы криптоанализа, построенный по архитектуре, приведенной на рис. 2 представляет собой ПО, состоящее из:

1. Контроллера атак.
2. Контроллера пакетов запусков.
3. Системы регистрации и учёта действий пользователя.
4. Графического пользовательского интерфейса, построенного по шаблону MVP (Model-View-Presenter) [16].

Покажем на примере атаки с известным открытым текстом на криптосистему Доминго-Феррера как выглядит реализация криптоанализа с применением предложенных средств.

Выбраны следующие параметры:

- 1) $p = 17$; $q = 13$;
- 2) $n = p * q = 17 * 13 = 221$;
- 3) $d = 2$.

В качестве ключа шифрования был выбран ключ $(r_p, r_q) = (5, 4)$ и сформированы 3 пары (открытый текст – шифртекст), приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Пары (открытый текст – шифртекст) для проведения атаки с известным открытым текстом на криптосистему Доминго-Феррера

Открытый текст	Шифртекст	
	$\pi(x)$	$\rho(x)$
218	$12x^2 + 3x$	$11x^2 + 8x$
104	$10x^2 + 8x$	$x^2 + 3x$
199	$3x^2 + 5x$	$7x^2 + 11x$

Для поиска первой части ключа r_p сформирована матрица A , приведенная в формуле (20).

$$A = \begin{pmatrix} 218 & 3 & 12 \\ 104 & 8 & 10 \\ 199 & 5 & 3 \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Факторизация числа n раскрыта по формулам (21) и (22).

$$p = \text{НОД}(-13498, 221) = 17. \quad (21)$$

$$q = \frac{n}{p} = \frac{221}{17} = 13. \quad (22)$$

Для поиска первой части ключа r_p сформирована матрица Bp , представляющая СЛАУ по формуле (23).

$$Bp \equiv \begin{pmatrix} -14 & 3 & 12 \\ -2 & 8 & 10 \\ -12 & 5 & 3 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \pmod{17}. \quad (23)$$

Методом Гаусса найдено решение t СЛАУ Bp по формулам (24) и (25).

$$Bp \equiv \begin{pmatrix} -14 & 3 & 12 \\ -2 & 8 & 10 \\ -12 & 5 & 3 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} -14 & 3 & 12 \\ -13 & 14 & 0 \\ -12 & 5 & 3 \end{pmatrix} \pmod{17}. \quad (24)$$

$$14t \equiv 13 \pmod{17}; t \equiv 13 \cdot 14^{-1} \pmod{17} \equiv 13 \cdot 11 \equiv 7 \pmod{17}. \quad (25)$$

Значение первой части ключа r_p вычислено по формуле (26).

$$r_p \equiv t^{-1} \pmod{p} \equiv 7^{-1} \pmod{17} \equiv 5. \quad (26)$$

Для поиска второй части ключа r_q сформирована матрица Bq , представляющая СЛАУ по формуле (27).

$$Bq \equiv \begin{pmatrix} -14 & 8 & 11 \\ -2 & 3 & 1 \\ -12 & 11 & 7 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \pmod{13}. \quad (27)$$

Методом Гаусса найдено решение t СЛАУ Bq по формулам (28) и (29).

$$Bq \equiv \begin{pmatrix} -14 & 8 & 11 \\ -2 & 3 & 1 \\ -12 & 11 & 7 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} -14 & 8 & 11 \\ -5 & 7 & 0 \\ -12 & 11 & 7 \end{pmatrix} \pmod{13}. \quad (28)$$

$$7t \equiv 5 \pmod{13}; t \equiv 5 \cdot 7^{-1} \pmod{13} \equiv 5 \cdot 2 \equiv 10 \pmod{13}. \quad (29)$$

Значение второй части ключа r_q вычислено по формуле (30).

$$r_q \equiv t^{-1} \pmod{q} \equiv 10^{-1} \pmod{13} \equiv 4. \quad (30)$$

Найденный в результате атаки ключ $(r_p, r_q) = (5, 4)$ идентичен ключу, использованному при формировании пар (открытый текст – шифртекст), что доказывает успешность проведенной атаки.

Атаки на гомоморфные шифры, основанные на задаче факторизации чисел могут иметь различные типы и отличаться по сценарию, вследствие чего их невозможно объединить в единый программный модуль. Поэтому система криптоанализа предоставляет

интерфейсы и модули, в рамках которых прикладной программист реализует этапы атаки, представленные в формулах (20)–(30). Система обеспечивает удобные и универсальные механизмы для хранения, отображения и редактирования исходных данных и результатов атак путем создания пакета запусков, связанного с реализацией конкретной атаки. Таким образом, система предоставляет необходимые инструменты для реализации и оценки эффективности методов криптоанализа через программные интерфейсы и модули, что позволяет прикладному программисту сосредоточиться на реализации самой атаки, а не затрачивать время на создание окружения.

Реализация системы криптоанализа гомоморфных шифров, основанных на задаче факторизации чисел, была выполнена на языке программирования C#10 (.NET 6.0) [17, 18].

Основные программные модули, общие для анализа гомоморфных шифров, основанных на задаче факторизации чисел, определяются в ядре приложения, которое не имеет зависимостей от других модулей системы, а также от целевой платформы.

Разработанные прикладным программистом атаки собираются в файлы DLL (Dynamic Link Library), которые затем подключаются к ядру приложения динамически с помощью контроллера атак [19].

Для удобства пользователей взаимодействие с пакетом запусков осуществляется с помощью системы регистрации и учёта действий пользователя (operation-oriented механизм Undo / Redo) [20].

Графический интерфейс системы реализован с помощью шаблона графического пользовательского интерфейса MVP (Model-View-Presenter) [16]. Модель (model) и представитель (presenter) реализованы в ядре, отображение (view) – в отдельном проекте Windows Forms. Поскольку архитектура системы модульная, для переноса системы на другую платформу достаточно создать только отображение для новой платформы без необходимости внесения изменений в другие модули.

Заключение. В данной работе была подробно рассмотрена симметричная крипто-система Доминго-Феррера, проанализирована и проведена атака с известным открытым текстом на эту криптосистему. На примере криптосистемы Доминго-Феррера обоснован набор параметров и функций, общих для гомоморфных шифров, основанных на задаче факторизации чисел с целью определения архитектурных особенностей системы автоматизации выполнения криптоанализа. Сформирована архитектура системы, обеспечивающая удобные и универсальные инструменты для хранения, отображения и редактирования исходных данных и результатов атак.

В качестве шаблона проектирования пользовательского интерфейса был выбран MVP (Model-View-Presenter), разработанный для разделения ответственности в презентационной логике, в результате чего было достигнуто простота переноса программного решения на другие платформы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Короткова Д.А.* Полностью гомоморфное шифрование // Аллея науки. – 2018. – Т. 5, № 5. – С. 1144-1146.
2. *Micciancio D.* A first glimpse of cryptography's Holy Grail // Communications of the ACM. – 2010. – Vol. 53, No. 3. – P. 96-96.
3. *Бабенко Л.К., Буртыка Ф.Б., Макаревич О.Б., Трепачева А.В.* Полностью гомоморфное шифрование (обзор) // Вопросы защиты информации. – 2015. – № 3. – С. 3-26.
4. *Potey M.M., Dhote C.A., Sharma D.H.* Homomorphic Encryption for Security of Cloud Data // Procedia Computer Science. – 2016. – Vol. 100, No. 79. – P. 175-181.
5. *Петренко А.С.* О реализации частично гомоморфной криптосистемы RSA // The 2019 Symposium on Cybersecurity of the Digital Economy-CDE'19. – 2019. – С. 266-268.
6. *Parmar P.V. et al.* Survey of various homomorphic encryption algorithms and schemes // International Journal of Computer Applications. – 2014. – Vol. 91, No. 8.
7. *Brakerski Z., Gentry C., Vaikuntanathan V.* (Leveled) fully homomorphic encryption without bootstrapping // ACM Transactions on Computation Theory (TOCT). – 2014. – Vol. 6, No. 3. – P. 1-36.
8. *Fan J., Vercauteren F.* Somewhat practical fully homomorphic encryption // Cryptology ePrint Archive. – 2012.

9. Gentry C., Halevi S., Smart N.P. Better bootstrapping in fully homomorphic encryption // International Workshop on Public Key Cryptography. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. – P. 1-16.
10. Zvika Brakerski. Fully homomorphic encryption without modulus switching from classical gapsvp // Annual Cryptology Conference. – Springer, 2012. – P. 868-886.
11. Тречаева А.В. Улучшенная атака по известным открытым текстам на гомоморфную криптосистему Доминго-Феррера // Тр. Института системного программирования РАН. – 2014. – Т. 26, № 5. – С. 83-98.
12. Тречаева А.В. Криптоанализ симметричных полностью гомоморфных линейных криптосистем на основе задачи факторизации чисел // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 5 (166). – С. 89-102.
13. Alabdulatif A., Kaosar M. Privacy preserving cloud computation using Domingo-Ferrer scheme // Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences. – 2016. – Vol. 28, No. 1. – P. 27-36.
14. Cheon J.H., Kim W.H., Nam H.S. Known-plaintext cryptanalysis of the Domingo-Ferrer algebraic privacy homomorphism scheme // Information Processing Letters. – 2006. – Vol. 97, No. 3. – P. 118-123.
15. Cheon J.H., Nam H.S. A cryptanalysis of the original domingo-ferrer's algebraic privacy homomorphism // Cryptology EPrint Archive. – 2003.
16. Kalelkar M., Churi P., Kalelkar D. Implementation of model-view-controller architecture pattern for business intelligence architecture // International Journal of Computer Applications. – 2014. – Vol. 102, No. 12.
17. Hejlsberg A. et al. The C# programming language. – Pearson Education, 2008.
18. Bahar A.Y. et al. Survey on Features and Comparisons of Programming Languages (PYTHON, JAVA, AND C#) // 2022 ASU International Conference in Emerging Technologies for Sustainability and Intelligent Systems (ICETSIS). – IEEE, 2022. – P. 154-163.
19. Нагибин В.А. Проектирование и реализация системы подключаемых модулей в приложениях на языке C // Путь в науку: прикладная математика, информатика и информационные технологии. – 2023. – С. 27-29.
20. Мартынов А. Back/Forward и Undo/Redo в .NET-приложениях // RSDN Magazine. – 2003. – No. 2.

REFERENCES

1. Korotkova D.A. Polnost'yu gomomorfnoe shifrovanie [Fully homomorphic encryption], *Alleya nauki* [Science Alley], 2018, Vol. 5, No. 5, pp. 1144-1146.
2. Micciancio D. A first glimpse of cryptography's Holy Grail, *Communications of the ACM*, 2010, Vol. 53, No. 3, pp. 96-96.
3. Babenko L.K., Burtyka F.B., Makarevich O.B., Trepacheva A.V. Polnost'yu gomomorfnoe shifrovanie (obzor) [Fully homomorphic encryption (review)], *Voprosy zashchity informatsii* [Information security issues], 2015, No. 3, pp. 3-26.
4. Potey M.M., Dhote C.A., Sharma D.H. Homomorphic Encryption for Security of Cloud Data, *Procedia Computer Science*, 2016, Vol. 100, No. 79, pp. 175-181.
5. Petrenko A.S. O realizatsii chastichno gomomorfnoy kriptosistemy RSA [On the implementation of the partially homomorphic RSA cryptosystem], *The 2019 Symposium on Cybersecurity of the Digital Economy-CDE'19*, 2019, pp. 266-268.
6. Parmar P.V. et al. Survey of various homomorphic encryption algorithms and schemes, *International Journal of Computer Applications*, 2014, Vol. 91, No. 8.
7. Brakerski Z., Gentry C., Vaikuntanathan V. (Leveled) fully homomorphic encryption without bootstrapping, *ACM Transactions on Computation Theory (TOCT)*, 2014, Vol. 6, No. 3, pp. 1-36.
8. Fan J., Vercauteren F. Somewhat practical fully homomorphic encryption // Cryptology ePrint Archive. – 2012.
9. Gentry C., Halevi S., Smart N.P. Better bootstrapping in fully homomorphic encryption, *International Workshop on Public Key Cryptography*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 1-16.
10. Zvika Brakerski. Fully homomorphic encryption without modulus switching from classical gapsvp, *Annual Cryptology Conference*. Springer, 2012, pp. 868-886.
11. Trepacheva A.V. Uluchshennaya ataka po izvestnym otkryтым текстам na gomomorfnyuyu kriptosistemu Domingo-Ferrera [Improved Known Plaintext Attack on the Domingo-Ferrer Homomorphic Cryptosystem], *Tr. Instituta sistemnogo programirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Sciences], 2014, Vol. 26, No. 5, pp. 83-98.
12. Trepacheva A.V. Kriptoanaliz simmetrichnykh polnost'yu gomomorfnykh lineynykh kriptosistem na osnove zadachi faktorizatsii chisel [Cryptanalysis of symmetric fully homomorphic linear cryptosystems based on the problem of factorization of numbers], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 5 (166), pp. 89-102.

13. Alabdulatif A., Kaosar M. Privacy preserving cloud computation using Domingo-Ferrer scheme, *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2016, Vol. 28, No. 1, pp. 27-36.
14. Cheon J.H., Kim W.H., Nam H.S. Known-plaintext cryptanalysis of the Domingo-Ferrer algebraic privacy homomorphism scheme, *Information Processing Letters*, 2006, Vol. 97, No. 3, pp. 118-123.
15. Cheon J.H., Nam H.S. A cryptanalysis of the original domingo-ferrer's algebraic privacy homomorphism, *Cryptology EPrint Archive*, 2003.
16. Kalelkar M., Churi P., Kalelkar D. Implementation of model-view-controller architecture pattern for business intelligence architecture, *International Journal of Computer Applications*, 2014, Vol. 102, No. 12.
17. Hejlsberg A. et al. The C# programming language. Pearson Education, 2008.
18. Bahar A.Y. et al. Survey on Features and Comparisons of Programming Languages (PYTHON, JAVA, AND C#), *2022 ASU International Conference in Emerging Technologies for Sustainability and Intelligent Systems (ICETSIS)*. IEEE, 2022, pp. 154-163.
19. Nagibin V.A. Proektirovanie i realizatsiya sistemy podklyuchaemykh moduley v prilozheniyakh na yazyke C [Design and implementation of a system of plug-in modules in applications in the C language], *Put' v nauku: prikladnaya matematika, informatika i informatsionnye tekhnologii* [Path to science: applied mathematics, computer science and information technology], 2023, pp. 27-29.
20. Martynov A. Back/Forward i Undo/Redo v .NET-prilozheniyakh [Back/Forward and Undo/Redo in .NET applications], *RSDN Magazine* [RSDN Magazine], 2003, No. 2.

Статью рекомендовала к опубликованию д.ф.-м.н. Ф.Б. Тебуева.

Бабенко Людмила Климентьевна – Южный федеральный университет; e-mail: lkbabenko@sfedu.ru; тел.: +79054530191; г. Таганрог, Россия; кафедра безопасности информационных технологий им. Макаревича О.Б.; д.т.н.; профессор.

Стародубцев Виталий Сергеевич – e-mail: vstarodubcev@sfedu.ru; тел.: +79996928150; кафедра безопасности информационных технологий им. Макаревича О.Б.; студент.

Babenko Lyudmila Kliment'evna – Southern Federal University; e-mail: lkbabenko@sfedu.ru; phone: +79054530191; Taganrog, Russia; the Department of Information Technology Security Named after Makarevich O.B.; dr of eng. sc.; professor.

Starodubcev Vitalij Sergeevich – e-mail: vstarodubcev@sfedu.ru; phone: +79996928150; the Department of Information Technology Security named after Makarevich O.B.; student.

УДК 004.383.3

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-64-70

Д.И. Бакшун, И.И. Турулин

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУРЫ РЕКУРСИВНОГО ФИЛЬТРА С КОНЕЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ В ВИДЕ ФУНКЦИИ, АППРОКСИМИРУЮЩЕЙ ОКНО ХАННА

Фильтры с импульсной характеристикой (ИХ) в виде весовой (сглаживающей) функцией находят применение в абсолютно разных областях цифровой обработки сигналов, таких как спектральный анализ – с целью уменьшения эффекта Гиббса, в формировании амплитудного распределения – для уменьшения уровня боковых лепестков, в том числе для радиотехнических систем с синтезированной апертурой и других. В статье рассмотрена структура рекурсивного КИХ-фильтра (РКИХ-фильтра) с ИХ в виде аппроксимированного окна Ханна при ограниченном фиксированном количестве операций перемножения и суммирования для любой длительности окна. Такая структура имеет существенно меньшую вычислительную сложность по сравнению с классической структурой КИХ-фильтра, и применять её можно во встраиваемых системах с ограниченными вычислительными ресурсами. Функция, аппроксимирующая окно Ханна, представляет собой полином третьей степени, коэффициенты которого рассчитаны с использованием дискретного интегрирования квазисинусной функции. Получена аналитическая формула для коэффициентов нерекурсивной части фильтра путём вычисления обратной конечной разности четвертой степени от аппроксимирующей функции окна Ханна. Коэффициентами нерекурсивной части являются целые числа, значения которых зависят от числа отсчетов (длины) полупериода квазисинусной функции, что упрощает реализацию подобного РКИХ-фильтра на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Вычислена средняя абсолютная ошибка аппрок-

симиации при росте длины окна. При числе отсчетов ИХ менее 600 ошибка не превышает 4,5%, что является показателем высокой точности соответствия аппроксимирующей функции окну Ханна. Авторами предложена дальнейшая перспектива развития структуры РКИХ-фильтра с ИХ в виде аппроксимирующей функции окна Ханна. Данная структура позволяет реализовать РКИХ-фильтр с изменением длины окна Ханна во временной области при сохранении устойчивости за счет точного выполнения операций вычисления благодаря использованию коэффициентов нерекурсивной части, которые являются числами с фиксированной точкой, и их линейной зависимости от длины полупериода квазисинусной функции.

Рекурсивный; ПЛИС; КИХ-фильтр; окно Ханна; конечная импульсная характеристика; устойчивость.

D.I. Bakshun, I.I. Turulin

A TECHNIQUE FOR CONSTRUCTING THE STRUCTURE OF A RECURSIVE FILTER WITH A FINITE IMPULSE RESPONSE IN THE FORM OF A FUNCTION APPROXIMATING THE HANN WINDOW

Filters with an impulse response (IR) in the form of a weighting (smoothing) function are used in completely different areas of digital signal processing, such as spectral analysis - in order to reduce the Gibbs effect, in the formation of an amplitude distribution – to reduce the level of side lobes, including for radio engineering systems with synthesized aperture and others. The article considers the structure of a recursive FIR filter (RFIR-filter) with IR in the form of an approximated Hann window with a limited fixed number of multiplication and summation operations for any window duration. Such a structure has significantly lower computational complexity compared to the classical structure of the FIR-filter, and it can be used in embedded systems with limited computing resources. The function approximating the Hann window is a polynomial of the third degree, the coefficients of which are calculated using a specific integration of the quasi-sine function. An analytical formula is obtained for the coefficients of the non-recursive part of the filter by calculating the inverse finite difference of the fourth degree from the approximating function of the Hann window. The coefficients of the non-recursive part are integers, the values of which depend on the number of samples (length) of the half-cycle of the quasi-sine function, which simplifies the implementation of such an RFIR-filter based on a programmable logic integrated circuit (FPGA). The average absolute approximation error is calculated with an increase in the length of the window. When the number of samples is less than 600, the error does not exceed 4.5%, which is an indicator of the high accuracy of matching the approximating function to the Hann window. The authors propose a further perspective for the development of the structure of the RFIR-filter with IR in the form of an approximating function of the Hann window. This structure makes it possible to implement a RFIR-filter with a change in the length of the Hann window in the time domain while maintaining stability by accurately performing calculation operations using the coefficients of the non-recursive part, which are fixed-point numbers, and their linear dependence on the half-period length of the quasi-cosine function.

Recursive; FPGA; FIR-filter; Hann window; finite impulse response; stability.

Введение. Спектральный анализ предназначен для разложения исследуемого сигнала на гармонические составляющие и широко применяется в различных областях науки и техники, например, таких как аналитическая химия, астрофизика, металлургия, радиолокация и т.д.

При работе с дискретными сигналами для выполнения спектрального анализа основным методом является дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Так как из-за невозможности обработки исследуемого сигнала бесконечной длительности операция ДПФ всегда выполняется только для отрезка исследуемого сигнала, это в общем случае ведет к эффекту Гиббса, который вызывает искажение результата. Для снижения этого эффекта при спектральном анализе применяется свертка исследуемого сигнала и сглаживающей оконной (весовой) функции.

Структура, выполняющая линейную свертку дискретного входного сигнала с оконной функцией, соответствует цифровому КИХ-фильтру, коэффициенты которого равны дискретным отсчетам оконной функции. Для выполнения линейной свертки количество операций перемножения и сложения определяется длиной оконной функции, следовательно, при ее длительности, равной N , требуется выполнить N перемножений и $N - 1$

сложений. Так как оконная функция обычно имеет симметричный вид, то количество операций перемножения можно сократить в два раза. Значительно сократить количество вычислений можно используя рекурсивный КИХ-фильтр [1–5] с импульсной характеристикой (ИХ) в виде полинома, аппроксимирующего оконную функцию. В статье предложена структура рекурсивного КИХ-фильтра с ИХ, представляющей собой окно Ханна, реализованное на основе квазикосинусной функции в виде степенного полинома. Применение данного РКИХ-фильтра позволяет значительно сократить вычисления – до четырех операций перемножения и до двенадцати операций сложения для произвольной длительности окна.

Постановка задачи. Окно Ханна длительностью N представляет собой сумму функции косинуса и постоянного уровня, отличных от нуля на отрезке $-N/2, \dots, 0, \dots, N/2$

$$w(n) = 0,5 + 0,5 \cos(2\pi n/N) \text{ для } n = -N/2, \dots, 0, \dots, N/2, \quad (1)$$

иначе $w(n) = 0$.

Для получения ИХ, приближенной к выражению (1), необходимо представить ее в виде полинома третьей степени, коэффициенты которого являются целыми числами (или числами с фиксированной точкой). Для этого возьмем за основу функцию квазисинуса, аналитическое выражение которой соответствует полиному второй степени (полуволны аппроксимированы отрезками парабол) и произведем ее дискретное интегрирование. Результатом будет являться функция квазикосинуса с постоянной составляющей, равной максимальному значению функции. Для реализации РКИХ-фильтра требуется вычислить коэффициенты нерекурсивной части путем дискретного дифференцирования (нахождение обратной конечной разности) четвертого порядка от функции квазикосинуса с ее последующим дискретным интегрированием четвертого порядка в рекурсивной части. После дискретного дифференцирования четвертого порядка большая часть коэффициентов нерекурсивной части будет равна нулю, следовательно, количество операций перемножения сократится. Восстановление исходной КИХ происходит каскадным включением 4-х дискретных интеграторов (или эквивалентного им фильтра) причём обязательно после нерекурсивной части. Это необходимо, чтобы на входе каждого интегратора отсутствовала постоянная составляющая, и они ее не интегрировали вплоть до выхода содержимого сумматора за пределы разрядной сетки. [1, 2].

Вычисление коэффициентов нерекурсивной части фильтра. Половину периода дискретной квазисинусоиды можно представить в виде параболы $h_{x1}(n)$ с длительностью L , тогда полный период будет являться суммой функции $h_{x1}(n)$ и ее копией $h_{x2}(n)$, задержанной на L и умноженной на минус один:

$$h_x(n) = h_{x1}(n) + h_{x2}(n), \quad (2)$$

где $h_{x1}(n) = -n^2 + Ln$ для $0 \leq n \leq L$, иначе $h_{x1}(n) = 0$;
 $h_{x2}(n) = n^2 - 3Ln + 2L^2$ для $L \leq n \leq 2L$, иначе $h_{x2}(n) = 0$;
 $n = 0, 1, 2, \dots \infty$.

Следует отметить, что при формировании квазисинусоиды по формуле (2) количество точек всегда будет равно $2L + 1$, а после ее интегрирования $2L$. Тогда для достижения симметрии ИХ относительно центрального отсчета оконной функции (как и любой другой ИХ КИХ-фильтра) необходимо, чтобы длительность имела нечетное количество отсчетов [6, 7].

Для изменения длительности квазисинусоиды $h_x(n)$ выполним преобразование $f(n) = f(n) + f(n - 1)$ тогда:

$$h_y(n) = h_{y1}(n) + h_{y2}(n), \quad (3)$$

где $h_{y1}(n) = -2n^2 + 2(L + 1)n - (L + 1)$ для $1 \leq n \leq L$, иначе $h_{y1}(n) = 0$;
 $h_{y2}(n) = 2n^2 - (6L - 2)n + 4L^2 + 3L + 1$ для $L + 1 \leq n \leq 2L$, иначе $h_{y2}(n) = 0$.

Результатом дискретного интегрирования (суммирования от $-\infty$ до текущего номера отсчета) выражения (3) является аппроксимация окна Ханна, выраженная через функцию квазисинусоиды с количеством точек, равным $2L + 1$.

Обратная конечная разность степени r вычисляется по формуле $\nabla^r f(n) = f(n) - f(n - 1)$ [8], при этом $\nabla^1 h_{hann}(n) = h_y(n)$. Тогда конечная разность четвертой степени равна сумме единичных импульсов (дискретных дельта-функций):

$$\nabla^4 h_{hann}(n) = (L - 1)[\delta(0) + \delta(2L + 2)] + (-L - 1)[\delta(2) + \delta(2L)] + 2[(-1)\delta(1) + \delta(L) + 2\delta(L + 1) + \delta(L + 2) + (-1)\delta(2L + 2)]. \quad (4)$$

Из полученной формулы (4) следует, что для реализации нерекурсивной части РКИХ-фильтра потребуется четыре блока умножителей (два из которых умножают на 2, что является арифметическим сдвигом) и восемь блоков сумматоров. При этом еще четыре блока сумматоров потребуется для рекурсивной части фильтра в виде четырех интеграторов, подключенных каскадно. На рис. 1 изображена структура РКИХ-фильтра с ИХ в виде функции, аппроксимирующей окно Ханна. Стоит отметить, что рассмотренная структура работает корректно при соблюдении условия $L \geq 3$.

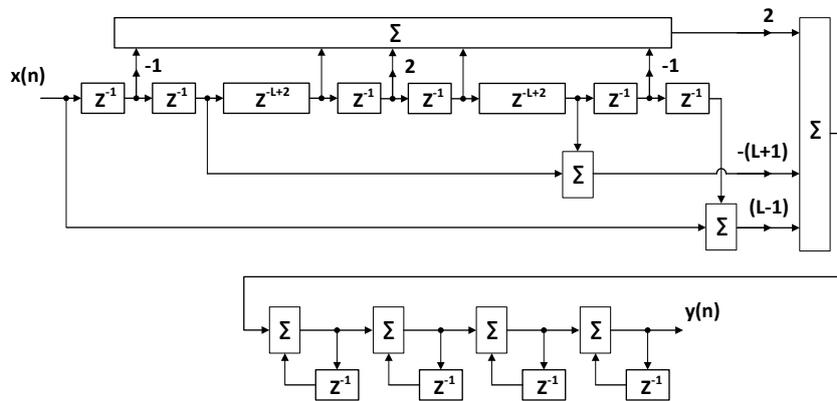


Рис. 1. Структура РКИХ-фильтра с ИХ в виде аппроксимирующей функцией окна Ханна

Так как аппроксимирующая функция принимает только целые значения, то при сравнении ее с оконной функцией необходимо использовать ее нормированное значение:

$$h'_{hann}(n) = h_{hann}(n)/G_{hann}, \quad (5)$$

где $G_{hann} = \max(h_{hann}) = (L^3 - L)/3$ – коэффициент усиления фильтра.

На рис. 2 изображен график сравнение ИХ $h'(n)$ исследуемого РКИХ-фильтра (синий цвет) и $w(n)$ окна Ханна (красный цвет), полученной с помощью инструмента Python функцией `scipy.signal.windows.hann()`. Длительность ИХ N для $h'(n)$ и $w(n)$ равна 16. На рис. 3 изображены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) $H(2f/f_s)$ для исследуемого РКИХ-фильтра и $W(2f/f_s)$ окна Ханна Python, где $2f/f_s$ – нормированная частота. При построении АЧХ использовалась функция `scipy.signal.freqz()`.

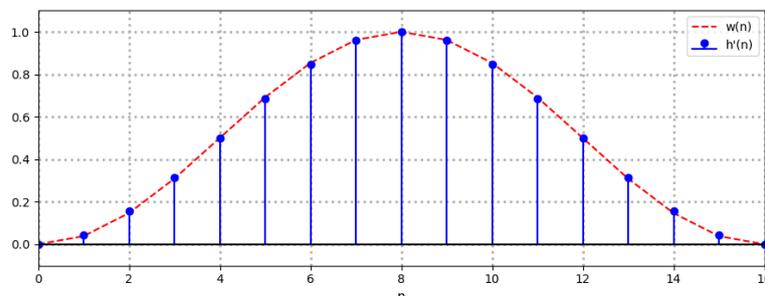


Рис. 2. Окно Ханна и нормированная ИХ РКИХ-фильтра

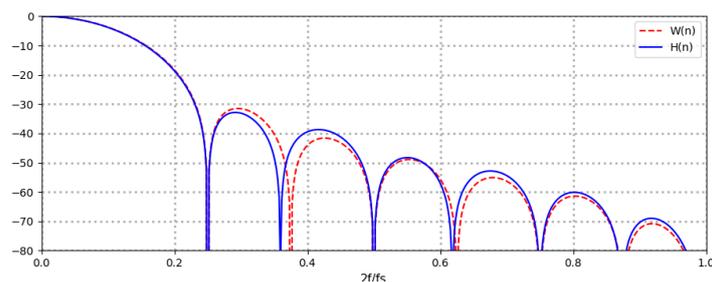


Рис. 3. АЧХ окна Ханна и РКИХ-фильтра

Погрешность аппроксимации окна Ханна. Применение аппроксимации ИХ в виде окна Ханна с помощью степенного полинома вызывает ошибку аппроксимации, обусловленную различием аппроксимирующей функции от исходной функции окна [8]. Средняя абсолютная ошибка аппроксимации окна Ханна с учетом (5) можно определить, как:

$$E(N) = (100\%/[N + 1]) \sum_n^N |w(n) - h'_{\text{hann}}| / w(n), \quad (6)$$

где N – длительность окна Ханна.

На рисунке представлен график $E(N)$. По результатам делается вывод о высокой точности аппроксимации ($E(N) < 4,5\%$ при $N < 600$). По графику видно, что зависимость ошибки от длительности окна приближается к линейной при $N > 200$.

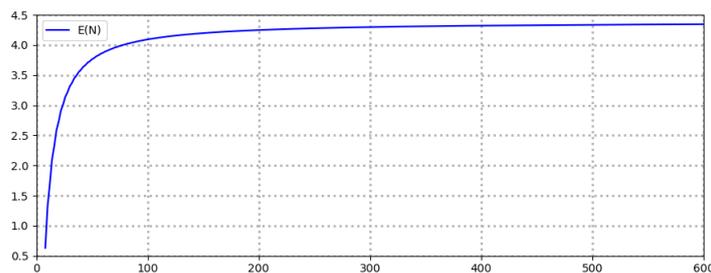


Рис. 4. Средняя абсолютная ошибка аппроксимации окна Ханна

Заключение. Разработана структура РКИХ-фильтра с ИХ в виде аппроксимирующей функцией окна Ханна с фиксированным числом операций перемножения и суммирования при произвольном порядке фильтра. Функция, аппроксимирующая окно Ханна, представляет собой полином третьей степени, коэффициенты которого рассчитаны с использованием дискретного интегрирования квазисинусной функции. Такая структура имеет существенно меньшую вычислительную сложность по сравнению с классической структурой КИХ-фильтра. Для длительности менее 600 отсчетов ошибка аппроксимации не превышает 4,5%, что является показателем высокой точности соответствия аппроксимирующей функции окну Ханна.

Из выражения (4) следует, что коэффициенты нерекурсивной части зависят от параметра L , тогда возможно дальнейшее внедрение управления длительностью ИХ во времени в структуру фильтра при сохранении устойчивости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Турулин И.И. Расчет и применение быстродействующих цифровых рекурсивных фильтров с конечной импульсной характеристикой: монография / под общ. ред. Л.К. Самойлова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999, – 88 с.
2. Турулин И.И. Основы теории рекурсивных КИХ-фильтров: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 264 с.

3. *Олейникова Т.В.* Исследование алгоритмов рекурсивных фильтров с конечными импульсными характеристиками для весовой обработки сигналов: дисс. ... канд. техн. наук. – Таганрог, 1999.
4. *Олейникова Т.В.* Применение быстрой циклической свертки в корреляционном измерителе временных интервалов // Тез. докладов всероссийской научной конференции «Новые информационные технологии. Информационное, программное и аппаратное обеспечение». – Таганрог, 1995. – С. 178-179. 38.
5. *Олейникова Т.В. Турулин И.И.* Весовая обработка близко расположенных сигнала и помехи окнами с характеристиками типа окна Хэмминга // Тез. докладов всероссийской научной конференции «Радиоэлектроника, микроэлектроника, системы связи и управления». – Таганрог, 1997. – С. 232-233.
6. *Лайонс Р.* Цифровая обработка сигналов. – 2-е изд.: пер. с англ. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с.
7. *Богнер Р., Константиноидис А.* Введение в цифровую фильтрацию: пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 216 с.
8. *Бронштейн И. Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1975.
9. *Соловьев В.В.* Логическое проектирование встраиваемых систем на FPGA. – СПб.: ООО «Медиа Группа Файнстрит», 2021. – 222 с.
10. *Рабинер Л., Голд Б.* Теория и применение цифровой обработки сигналов: пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 216 с.
11. *Томас Д.* Логическое проектирование и верификация систем на System Verilog: пер. с англ. А.А. Слинкина, А.С. Камкина, М.М. Чупилко. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 384 с.
12. *Хаханов В.И., Хаханов И.В., Литвинова Е.И. Гузь О.А.* Проектирование и верификация цифровых систем на кристаллах. Verilog & System Verilog. – Харьков: ХНУРЭ, 2010. – 528 с.
13. *Уэйкерли Ф.* Проектирование цифровых устройств. Т. 1. – М.: Постмаркет, 2002. – 544 с.
14. *Dam H.H., Nordebo S., Teo K.L., Cantoni A.* Design of linear phase FIR filters with recursive structure and discrete coefficients // IEEE International conference on acoustics, speech, and signal processing: collected papers. – Seattle, 1998. – P.1269-1272.
15. *Hassan F., Khorbotly S.* Recursive implementation of exponential linear phase FIR filters // 18th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems: collected papers. – Beirut, 2011. – P. 559-562.
16. *Lau B.K. Sreeram V.* Design of low order approximately linear phase IIR filters // IEEE Symposium on Advances in Digital Filtering and Signal Processing: collected papers. – Victoria, 1998. – P. 92-95.
17. *Chacko G.G., Moitra A., Caculo S.* Efficient Architecture for Implementation of Hermite Interpolation on FPGA // The 2018 Conference on Design & Architectures for Signal & Image Processing: collected papers. – Porto, 2018. – P. 7-12.
18. *Maximo A.* Efficient finite impulse response filters in massively-parallel recursive systems // Journal of Real-Time Image Processing: collected papers. – 2015. – Vol. 12. – P. 603-611.
19. *Moreira A., Prats-Iraola P.* Tutorial on Synthetic Aperture Radar // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. – 2013. – P. 6-43.
20. *Sklyarov V.* FPGA-based implementation of recursive algorithms // Microprocessors and Microsystems. Special Issue on FPGAs: Applications and Designs. – 2004. – Vol. 28/5-6. – P. 197-211.

REFERENCES

1. *Turulin I.I.* Raschet i primeneniye bystrodeystviyushchikh tsifrovyykh rekursivnykh fil'trov s konechnoy impul'snoy kharakteristikoy: monografiya [Calculation and application of high-speed digital recursive filters with finite impulse response: Monograph], under the general ed. L.K. Samoylova. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1999, 88 p.
2. *Turulin I.I.* Osnovy teorii rekursivnykh KIKh-fil'trov: monografiya [Fundamentals of the theory of recursive FIR filters: monograph]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, 264 p.
3. *Oleynikova T.V.* Issledovanie algoritmov rekursivnykh fil'trov s konechnymi impul'snymi kharakteristikami dlya vesovoy obrabotki signalov: diss. ... kand. tekhn. nauk [Investigation of algorithms for recursive filters with finite impulse characteristics for weight signal processing: cand. of eng. sc. diss.]. Taganrog, 1999.
4. *Oleynikova T.V.* Primeniye bystroy tsiklicheskoy svertki v korrelyatsionnom izmeritele vremennykh intervalov [The use of fast cyclic convolution in a correlation time interval meter], *Tez. dokladov vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Novye informatsionnye tekhnologii. Informatsionnoe, programnoe i apparatnoe obespechenie»* [Abstracts of reports of the All-Russian scientific conference "New information technologies. Information, software and hardware"]. Taganrog, 1995, pp. 178-179. 38.

5. *Oleynikova T.V., Turulin I.I.* Vesovaya obrabotka blizko raspolozhennykh signala i pomekhi oknami s kharakteristikami tipa okna Khemmign [Weight processing of closely spaced signal and interference by windows with characteristics of the type of a Hammign window], *Tez. dokladov vsrossiyskoy nauchnoy konferentsii «Radioelektronika, mikroelektronika, sistemy svyazi i upravleniya»* [Abstracts of reports of the All-Russian scientific conference "Radio electronics, microelectronics, communication and control systems"]. Taganrog, 1997, pp. 232-233.
6. *Layons R.* Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]. 2nd ed.: transl. from Engl. Moscow: OOO «Binom-Press», 2006, 656 p.
7. *Bogner R., Konstantinidis A.* Vvedenie v tsifrovuyu fil'tratsiyu [Introduction to digital filtering]: transl. from Engl. Moscow: Mir, 1976, 216 p.
8. *Bronshhteyn I. N., Semendyaev K.A.* Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov [Handbook of Mathematics for engineers and university students]. Moscow: Nauka, 1975.
9. *Solov'ev V.V.* Logicheskoe proektirovanie vstraivaemykh sistem na FPGA [Software design of an embedded system on FPGA]. Saint Petersburg: OOO «Media Gruppya Faynstrit», 2021, 222 p.
10. *Rabiner L., Gould B.* Teoriya i primenenie tsifrovoy obrabotki signalov [Theory and application of digital signal processing]: transl. from Engl. Moscow: Mir, 1976, 216 p.
11. *Tomas D.* Logicheskie proektirovanie i verifikatsiya sistem na System Verilog [Logical design and verification of the Verilog system]: transl. from Engl. A.A. Slinkina, A.S. Kamkina, M.M. Chupilko. Moscow: DMK Press, 2019, 384 p.
12. *Khakhanov V.I., Khakhanov I.V., Litvinova E.I. Guz' O.A.* Proektirovanie i verifikatsiya tsifrovyykh sistem na kristallakh. Verilog & System Verilog [Design and verification of digital systems on crystals. Verilog and the Verilog system]. Khar'kov: KhNURE, 2010, 528 p.
13. *Ueykerli F.* Proektirovanie tsifrovyykh ustroystv [Design of digital devices]. Vol. 1. Moscow: Postmarket, 2002, 544 p.
14. *Dam H.H., Nordebo S., Teo K.L., Cantoni A.* Design of linear phase FIR filters with recursive structure and discrete coefficients, *IEEE International conference on acoustics, speech, and signal processing: collected papers*. Seattle, 1998, pp.1269-1272.
15. *Hassan F., Khorbotly S.* Recursive implementation of exponential linear phase FIR filters, *18th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems: collected papers*. Beirut, 2011, pp. 559-562.
16. *Lau B.K. Sreeram V.* Design of low order approximately linear phase IIR filters, *IEEE Symposium on Advances in Digital Filtering and Signal Processing: collected papers*. Victoria, 1998, pp. 92-95.
17. *Chacko G.G., Moitra A., Caculo S.* Efficient Architecture for Implementation of Hermite Interpolation on FPGA, *The 2018 Conference on Design & Architectures for Signal & Image Processing: collected papers*. Porto, 2018, pp. 7-12.
18. *Maximo A.* Efficient finite impulse response filters in massively-parallel recursive systems, *Journal of Real-Time Image Processing: collected papers*, 2015, Vol. 12, pp. 603-611.
19. *Moreira A., Prats-Iraola P.* Tutorial on Synthetic Aperture Radar, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2013, pp. 6-43.
20. *Sklyarov V.* FPGA-based implementation of recursive algorithms, *Microprocessors and Microsystems. Special Issue on FPGAs: Applications and Designs*, 2004, Vol. 28/5-6, pp. 197-211.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Н. Чернов.

Бакшун Дмитрий Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: bakshun@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185988588; аспирант.

Турулин Игорь Ильич – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; тел.: +79618170609; д.т.н.; профессор.

Bakshun Dmitry Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: bakshun@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185988588; postgraduate student.

Turulin Igor Pyich – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; phone: +79618170609; dr. of eng. sc.; professor.

Е.М. Герасименко, В.В. Стеценко

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОНАЛЬНОСТИ ТЕКСТА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ
МОДИФИКАТОРОВ ИНТЕНСИВНОСТИ И ПРИМЕНЕНИЕМ
НЕЧЕТКИХ ПРАВИЛ**

Выражение чувств – неотъемлемая часть человеческой жизни и коммуникации. Чтобы создать компьютеры, способные лучше служить человечеству, в области информатики продолжают исследования по разработке алгоритмов машинного обучения, которые могут обрабатывать текстовые данные и выполнять задачи анализа тональности текстов на естественном языке. Доступность онлайн-обзоров и повышенные ожидания конечных пользователей также стимулируют разработку систем интеллектуального анализа мнений, которые могут автоматически классифицировать и обобщать отзывы пользователей. С каждым годом исследований в области распознавания эмоций в тексте все больше, но только малая их часть посвящена применению нечеткой логики. В основном, это происходит потому, что исследователи ограничиваются бинарной классификацией отношений – «положительное» и «отрицательное», реже добавляя еще третий класс – «нейтральное». Применение же нечеткой логики помогает определить оттенки эмоций, не просто «хорошо» и «плохо», а насколько хорошо или насколько плохо. Количество определяемых классов определяет глубину детализации. Ранее нами была предложена нечеткая модель определения тональности на основе словарей, в данном исследовании мы предлагаем улучшенную модель определения тональности текста на основе тонального словаря (SentiWordNet) и нечетких правил. Для повышения точности и достоверности анализа тональности были применены коэффициенты, учитывающие эмоциональную нагрузку слов разных частей речи и действие модификаторов интенсивности, способствующих усилению либо ослаблению эмоциональных оттенков. Количественное значение тональности текста получено в результате агрегирования нормированных данных по эмоциональным классам с применением методов нечеткого вывода. В результате исследования было выявлено, что учет влияния модификаторов интенсивности значительно повышает точность предложенного ранее авторами метода, а также способствует определению границ при проведении детализированной оценки отношений по 7 классам («очень положительное», «положительное», «скорее положительное», «нейтральное», «скорее отрицательное», «отрицательное», «очень отрицательное»).

Анализ тональности; нечеткие правила; модификаторы интенсивности; словарь тональности.

E.M. Gerasimenko, V.V. Stetsenko

**TEXT SENTIMENT ANALYSIS BASED ON FUZZY RULES AND INTENSITY
MODIFIERS**

Expressing feelings is a hidden part of hard life and communication. To create computers that can better serve humanity, computer science continues to research into developing machine learning algorithms that can process text data and perform sentiment analysis tasks on natural language texts. Additionally, the availability of online reviews and increased end-user expectations are driving the development of system intelligence that can automatically categorize and share user reviews. Every year, research in this area has discovered more and more emotions in text, but only a small part of it has been devoted to the use of fuzzy logic. This mainly happens because the researchers often use binary classification – «positive» and «negative», less often adding a third class – «neutral». The use of fuzzy logic helps to determine emotions, and not just «good» and «bad», but the degree of these emotions. The number of classes is defined by determines of the level of detail. Previously, we proposed a fuzzy dictionary-based sentiment model, in this paper we propose an improved text sentiment determination model based on a sentiment dictionary (SentiWordNet) and fuzzy rules. To determine the accuracy and precision of sentiment analysis, coefficients were applied to observe the emotional load of words of different parts of speech and action modifiers that contribute to the strengthening or weakening of emotional tones. The quantitative value of the sentiment of the text is obtained by aggregating normalized data by emotional classes using fuzzy result methods. As a result of the study, it was found that taking into account all modifiers can significantly increase the accuracy of the method previously proposed by the authors, and also ensures the determination of boundaries when determining a detailed assessment of relationships in 7 classes (“very positive”, “positive”, “somewhat positive”, “neutral”, “somewhat negative”, “negative”, “very negative”).

Sentiment analysis; fuzzy rules; intensity modifiers; sentiment dictionary.

Введение. Развитие информационных технологий (ИТ) привело к значительному увеличению объема информации, подлежащей хранению, обработке и передаче с помощью компьютерных систем и сетей. Текст является одной из основных форм обмена информацией в обществе. В современном мире, где обмен текстовыми сообщениями происходит по всем возможным каналам связи, важно оперативно анализировать передаваемую информацию. Особое внимание уделяется проблеме анализа мнений интернет-пользователей. Такой анализ основан на поиске и последующем распознавании слов с эмоциональной нагрузкой в тексте. Благодаря обнаружению эмоций в текстовой информации коммерческие компании могут отслеживать потребности пользователей и своевременно реагировать на их отзывы о продуктах и услугах. На основе тонального анализа оценивается реакция на рекламу, прогнозируются фондовые рынки, ведется мониторинг качества жизни в режиме реального времени, что позволяет предотвращать опасные ситуации в обществе [1]. Использование ИТ-инструментов помогает не только понять коллективное поведение и оценить реакцию общества на маркетинговую деятельность, но и воздействовать на социальные системы и разрабатывать принципы государственной политики в различных сферах. Учитывая значительный потенциал практического применения, создание и развитие технологий обработки текста является актуальной задачей на всех этапах развития информационных систем.

Современное состояние проблемы определения тональности текста. В последние годы начали появляться подходы к обработке текста и анализу настроений на основе нечеткой логики, хотя количество таких статей до сих пор невелико по сравнению с работами, использующими методы машинного обучения или статистические подходы.

В статье [2] авторы представили новый подход к классификации коротких текстовых сообщений, основанный на нечеткой логике. Входные данные, используемые в предлагаемой модели, основанной на нечеткой логике, представляют собой множество полезных функций, извлеченных из каждого сообщения. Выходные данные – это степень релевантности каждого сообщения событию под названием «Сэнди». Для этого был разработан ряд нечетких правил и применены различные методы дефаззификации, существующие в литературе, для фаззификации была выбрана трапециевидная функция принадлежности, поскольку она проста и широко используется. В качестве результатов эксперимента сравнивались пять обычно используемых методов дефаззификации и исследователи пришли к выводу, что метод центроида более эффективен, чем другие методы.

Исследователи статьи, представленной в [3], использовали нейронные сети и нечеткие множества для улучшения качества классификации настроений. Этот метод классификации использует преимущества как нечеткой логики, так и нейронной сети NN для построения классификатора.

Для фаззификации входных данных авторы обзоров использовали гауссову функцию принадлежности, принцип максимума для дефаззификации, а для классификации они использовали многослойную сеть обратного распространения персептрона.

В [4] авторы предложили систему, основанную на нечетких правилах, для получения степеней чувствительности они использовали трапециевидную функцию принадлежности для фаззификации и максимальное значение выходного сигнала для шага дефаззификации. В качестве экспериментальных результатов этой работы авторы сравнили точность предложенного подхода с точностью двух других алгоритмов машинного обучения (наивного Байеса и деревьев решений), и результаты показали, что предложенный нечеткий метод достиг того же уровня производительности, что и два других алгоритма.

Лю и др. [5] разработали систему, основанную на нечетких правилах, которая используется в качестве вычислительных моделей для точного и интерпретируемого анализа настроений. Авторы использовали четыре набора данных обзоров фильмов. Для этого они использовали систему, основанную на нечетких правилах Цукамото, в связи с тем, что этот тип нечетких систем применим к задачам классификации. Для этапа фаззификации они использовали функцию нечеткой принадлежности в виде трапеции, методы \min/\max для применения правил и для агрегирования, а также максимальную выходных данных для этапа дефаззификации. В качестве экспериментальных результатов, они сравнили подход на основе нечетких правил с вычислительными моделями, в основе ко-

торых лежат популярные методы машинного обучения (наивный Байес и C4.5). Что касается точности классификации, был проведен эксперимент с использованием четырех наборов данных, состоящий из обзоров фильмов, результаты которого показывают, что подход к обучению по нечетким правилам работает немного лучше, чем хорошо известные наивные алгоритмы Байеса и C4.5, что указывает на пригодность подходов с нечеткими правилами для задач анализа тональности.

В своей работе Вонг и др. [6] предлагают новый подход к определению тональности, который определяется как дискриминатор общественных настроений (PSD), основанный на нечеткой логике и сложности настроений. Эксперименты показывают, что предлагаемый подход (PSD) может обеспечить точность и F1-меру, аналогичную традиционным методам машинного обучения.

Гани и др. [7] предложили систему на основе нечеткой логики для количественной оценки лояльности клиентов, выполнив классификацию настроений онлайн-отзывов. Они провели оценку настроений в отзывах клиентов, а затем применили систему нечеткой логики для измерения лояльности клиентов. Их экспериментальные результаты были многообещающими, и была получена высокая точность в 94%, превосходящая базовые методы.

Катария и Верма [8] разработали веб-систему для классификации настроений потребителей с использованием вычислительного интеллекта, который включал нечеткую кластеризацию *c-meap*. Удобный интерфейс значительно привлек целевую аудиторию, и можно добиться дальнейших улучшений, сосредоточив внимание на конфиденциальности, точности и надежности.

Надали и др. [9] предложили модель нечеткой логики для семантической классификации отзывов клиентов, используя подход, основанный на целостной лексике. Целью исследования было повышение точности классификации путем объединения прилагательных, наречий и глаголов. Результаты экспериментов показали, что система многообещающая. В будущем эта модель может быть улучшена путем настройки параметров.

Рахмат и Ахмад [10] разработали многоступенчатую систему сбора мнений, которая использовала основанный на правилах подход для извлечения признаков и оценки настроений для присвоения класса полярности. Предложенная технология использовала нечеткие функции для имитации эффекта различных лингвистических хеджей. Нечеткие лингвистические барьеры оперировали дескрипторами мнений. Точность этой системы была удовлетворительной.

Дей и Хак [11] описали систему сбора мнений для классификации отзывов клиентов на разных уровнях детализации. Было отмечено, что производительность предложенной системы была лучше, чем у других методов сравнения в области автомобилей.

Мяо и др. [12] изложили метод автоматического извлечения и классификации характеристик продукта и настроений, полученных с разных сайтов. Для этой цели были интегрированы различные лингвистические средства защиты, и производительность предлагаемой системы оценивалась путем применения различных вычислительных методов. Дальнейших улучшений можно добиться путем введения дополнительных первичных функций принадлежности, таких как треугольные и трапециевидные функции, с использованием методов приближенного рассуждения.

Постановка задачи. Анализ тональности текста, как и многие другие задачи обработки естественного языка, можно рассматривать как проблему классификации, которая обычно решает две задачи: классификацию субъективности (поскольку важной чертой мыслей и их тональности является субъективность) и классификацию текста как выражения позитивного, негативного или нейтрального отношения, известного как классификация тональности. Кроме того, информационные системы часто акцентируют внимание на выражении чувств и эмоций (гнев, радость, печаль и т.д.) или раскрывают намерения рассказчика (например, заинтересованность или незаинтересованность). Для учета субъективных факторов и неточной, приближенной информации, присущих выражению эмоций человека, целесообразно использовать методы и подходы нечеткой логики в процессе анализа тональности и определения тональности текстовой информации.

В частности, в [13] было предложено сочетание классификации эмодзи, классификации хэштегов и полярности текста в модели анализа тональности микроблогов с применением нечеткой логики. Нечеткое моделирование также использовалось для повышения интерпретируемости анализа тональности отзывов о фильме на основе субъективных оценок сюжетной линии и ожиданий от фильма [14, 15]. Нечеткая логика формализует способность человека к аппроксимации рассуждений и допускает небинарные значения истинности нечетких утверждений [16]. Существует ряд методов и алгоритмов реализации систем эмоционального анализа текстов, которые представляют собой два основных подхода к автоматической классификации текстовой информации. В частности, это методы, основанные на технологиях машинного обучения [17], и методы, основанные на словарях и правилах [18]. Наиболее популярными методами являются методы машинного обучения с учителем или без него, а именно, наивный байесовский классификатор, метод опорных векторов и алгоритмы глубокого обучения, пытающиеся имитировать работу человеческого мозга с помощью искусственных нейронных сетей. Все эти методы отличаются точностью и скоростью. Согласно другому подходу анализ тональности осуществляется путем нахождения и суммирования слов с эмоциональной нагрузкой в тексте с помощью заранее составленных тональных словарей и правил. На основе найденной эмоциональной лексики текст можно оценить по шкале, содержащей значения отрицательных и положительных слов. Преимуществом предлагаемого подхода является возможность реализации мультиклассового анализа тональности на уровне отдельных предложений. В данном исследовании была создана система выделения эмоций из текстовой информации на основе тонального словаря и нечетких правил. Особое внимание уделено изучению способов более детализированного определения тональности и нахождения количественного значения тональности текста с помощью методов нечеткого моделирования.

Предлагаемая модель. Для более детализированного определения эмоционального тона текста предложена улучшенная модель на основе тонального словаря, описанная ранее в [19], учитывающая вес модификаторов интенсивности и использующая для расширенной интерпретации результатов системы нечеткого вывода. Разработанный метод схематично показан на рис. 1.

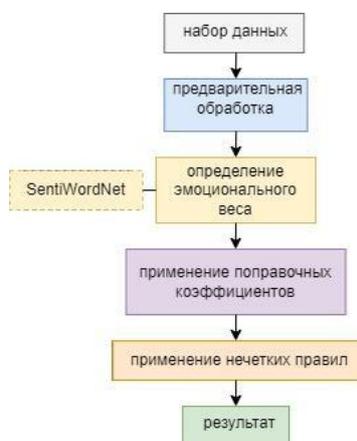


Рис. 1. Модель определения тональности

Автоматическое определение тональной окраски текста происходит в несколько этапов. Сначала загруженный текст проходит предварительную обработку. Текстовая информация разбивается на простые единицы (лексемы), т.е. осмысленные группы символов, соответствующие определенным образцам (например, словам). Как правило, токенизация [20] используется в качестве начального и фундаментального шага во многих задачах анализа данных. В результате, получается массив слов, который после исключения знаков препинания и стоп-слов используется для анализа тональности.

Следующим этапом алгоритма является последовательный поиск каждого слова из полученного массива в тональном словаре – SentiWordNet. Данный словарь был выбран, так как содержит не только тональную полярность, но и ее числовой эквивалент.

Зачастую оценочные слова в тексте могут сопровождаться словами-модификаторами интенсивности. Выделяют следующие группы модификаторов:

- ◆ концентраторы – усиливают тональность,
- ◆ расширители – снижают тональность,
- ◆ инверторы – преобразуют в обратную исходную тональность.

Таким образом, при анализе тональности нужно учитывать такие модификаторы и иметь некоторую численную модель, которая модифицирует исходные полярности слова. В табл. 1 приведены используемые в данном исследовании модификаторы.

Таблица 1

Модификаторы интенсивности

Концентратор	Расширитель	Инвертор
very	some	no
extremely	a little	not
At all	almost	
absolutely	barely	
really	slightly	
completely	partially	
so	somewhat	
highly		

Поскольку разные части речи по-разному влияют на общую оценку тона текста, к полученным значениям степени принадлежности слов к той или иной категории эмоций применяется поправочный коэффициент (табл. 2). К словам-инверторам коэффициент не применяется, так как они только меняют тональность на противоположную. Применяемый коэффициент снижает вес слов, имеющих меньшую эмоциональную нагрузку и, соответственно, меньше влияющих на результаты анализа тональности всего текста.

Таблица 2

Поправочные коэффициенты

	Прилагательное	Существительное	Глагол	Концентратор	Расширитель
Значение коэффициента	1	0,6	0,8	2	0,5

Заключительные этапы алгоритма включают процедуры суммирования эмоционального веса слов в каждой из категорий и их нормализации, а также определение общей тональности текста. Для определения не только качественной, но и количественной оценки эмоционального тона текста используется система нечеткого вывода.

В случае бинарного анализа эмоциональная оценка текста определяется той эмоциональной категорией, которая содержит наибольшее количество слов или характеризуется наибольшим суммарным значением эмоционального веса слов в этой категории. Однако, этот подход не учитывает интенсивности эмоциональной окраски, что может играть большую роль в электронной коммерции, в политике и при принятии решений, когда необходимо понимать оттенки отношения людей. Поскольку людям свойственны сомнения и неоднозначность, то применение нечёткой логики позволит интерпретировать результаты в более детализированном виде. Следовательно, реализован алгоритм нечеткого вывода для агрегирования полученных данных. Агрегирование истинности подусловий в каждом из нечетких правил осуществляется операцией нечеткой конъюнкции. Истинность выводов каждого нечеткого правила определяется с помощью процедуры min-активации вывода. Учитываются только активные продукционные правила, сте-

пень истинности условий которых отлична от нуля. Процедура дефаззификации выходной переменной осуществляется методом центра тяжести. В результате получается количественное значение эмоционального тона текста T_n в диапазоне от -1 до 1 . Интерпретация результатов происходит в соответствии с правилами:

Если $-1 \leq T_1 < -0,75$, то отношение «очень отрицательное» (VN)

Если $-0,75 < T_2 < -0,5$, то отношение «отрицательное» (N)

Если $-0,5 < T_3 < -0,25$, то отношение «скорее отрицательное» (SN)

Если $-0,25 < T_4 < 0,25$, то отношение «нейтральное» (Neut)

Если $0,25 < T_5 < 0,5$, то отношение «скорее положительное» (SP)

Если $0,5 < T_6 < 0,75$, то отношение «положительное» (P)

Если $0,75 < T_7 \leq 1$, то отношение «очень положительное» (VP)

Экспериментальные данные и интерпретация результатов. Тестирование предлагаемой системы анализа тональности было осуществлено с использованием набора данных v2.0 от Pang-Lee [21], содержащего 2000 отзывов (1000 положительных и 1000 отрицательных). Сравнение полученных результатов отражено в табл. 3.

Таблица 3

Точность предложенного метода

	Нечеткий метод на основе словаря SentiWordNet (%)	Усовершенствованный метод (%)
Accuracy	63,5	68,2

Как видно, точность определения тональности возросла на 5,7% по сравнению с ранее предложенным нечетким методом на основе словаря. Применение модификаторов позволило не только повысить точность определения тональности, но и определить границы перехода тональности из одного класса в другой, а применение нечетких правил помогло детализировать эмоциональную окраску текста (распределение отзывов по 7 классам тональности в процентах отражено в рис. 2), что может быть особенно полезно при определении степени удовлетворенности продуктом или услугой, а также для изменения уровня социальной напряженности.

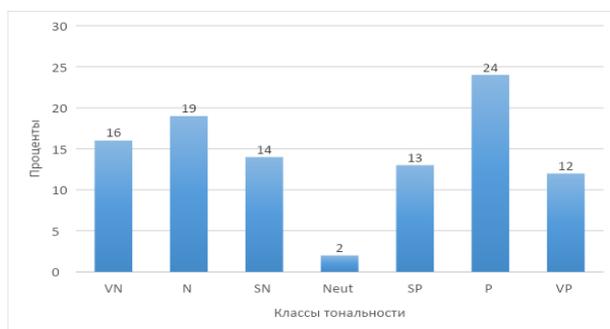


Рис. 2. Распределение отзывов по классам тональности

Заключение. В данной работе был усовершенствован предложенный ранее нечеткий метод на основе словаря SentiWordNet. Применение коэффициентов, учитывающих разную эмоциональную нагрузку на разные части речи и влияние модификаторов интенсивности, оказало влияние на результаты тонального анализа текстов, повысив точность метода на 5,7%. Использование дополнительных инструментов для анализа большего количества слов в тексте и их эмоционального веса позволит повысить обоснованность обнаружения эмоций и точность предложенного метода. В будущем планируется улучшить метод, добавив больше возможности настройки параметров, чтобы повысить точность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Mansour S.* Social media analysis of user's responses to terrorism using sentiment analysis and text mining // *Computer Science*. – 2018. – Vol. 140. – P. 95-103.
2. *Wu K., Zhou M., Lu X. S., et Huang L.* A Fuzzy Logic-Based Text Classification Method for Social Media Data // *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) Banff Center, Banff, Canada, October 5-8-2017*.
3. *Sathe J.B., Mali M.P.* A hybrid Sentiment Classification method using Neural Network and Fuzzy Logic // *11th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*. – 2017. – P. 93-96.
4. *Jefferson C., Liu H., Cocea M.* Fuzzy approach for sentiment analysis // *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. – 2017. – P. 1-6.
5. *Liu H., Cocea M.* Fuzzy rule based systems for interpretable sentiment analysis // *Ninth International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI)*. – 2017. – P. 129-136.
6. *Wang X., Zhang H. et Xu Z.* Public Sentiments Analysis Based on Fuzzy Logic for Text // *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*. – 2016. – Vol. 26. – P. 1341-1360.
7. *Ghani, Bajwa I., Ashfaq A.* A fuzzy logic based intelligent system for measuring customer loyalty and decision making // *Symmetry*. – 2018. – 10. – P. 761.
8. *Katarya R., Verma O.P.* An effective web page recommender system with fuzzy c-mean clustering // *Multimed. Tools Appl.* – 2017. – 76. – P. 21481-21496.
9. *Nadali S., Murad M.A.A., Kadir R.A.* Sentiment classification of customer reviews based on fuzzy logic // *International Symposium in Information Technology (ITSim), IEEE, Kuala Lumpur, Malaysia, 2010*. – Vol. 2. – P. 1037-1044.
10. *Rahmath P.H., Ahmad T.* Fuzzy based sentiment analysis of online product reviews using machine learning techniques // *Int. J. Comput. Appl.* – 2014. – 99. – P. 9-16.
11. *Dey L., Haque S.M.* Opinion mining from noisy text data // *International Journal on Document Analysis and Recognition (IJ DAR)*. – 2009. – Vol. 12. – P. 205-226.
12. *Miao Q., Li Q., Zeng D.* Fine-grained opinion mining by integrating multiple review sources // *J. Am. Soc. Inf. Sci. Technol.* – 2010. – Vol. 61. – P. 2288-2299.
13. *Howellsa K., Ertugan A.* Applying fuzzy logic for sentiment analysis of social media network data in marketing // *Procedia Computer Science*. – 2017. – Vol. 120. – P. 664-670.
14. *Jain P., Srivastava A., Singh V. and Hazela B.* Aspect based sentiment analysis by fuzzy logic // *International Journal of Current Engineering and Technology*. – 2019. – Vol. 9. – P. 243-248.
15. *Liu H., Cocea M.* Fuzzy rule based systems for interpretable sentiment analysis // *Proceedings Ninth International Conference on Advanced Computational Intelligence*. – 2017. – P. 129-136.
16. *Bai Y., Wang D.* Fundamentals of fuzzy logic control – fuzzy sets, fuzzy rules and defuzzifications // *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications. Advances in Industrial Control*. – Springer, 2006. – P. 17-36.
17. *Pang B., Lee L.* Opinion mining and sentiment analysis // *Foundations and Trends in Information Retrieval*. – 2006. – Vol. 2. – P. 1-135.
18. *Chopra F.K., Bhatia R.* Sentiment analyzing by dictionary based approach // *International Journal of Computer Applications*, – 2016. – Vol. 152. – P. 32-34.
19. *Герасименко Е.М., Стеценко В.В.* Анализ тональности текстовых отзывов с применением тональных словарей и кардинальности нечеткого множества // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2022. – № 5. – С. 106-116.
20. *Герасименко Е.М.* Интеллектуальный анализ данных. Алгоритмы Data Mining: учеб. пособие. Изд-во ЮФУ, 2017. – 82 с.
21. *Pang B., Lee L.* A sentimental education: Sentiment analysis using subjectivity summarization based on minimum cuts // *Proceedings of the 42nd annual meeting on Association for Computational Linguistics*. – 2004. – P. 271.

REFERENCES

1. *Mansour S.* Social media analysis of user's responses to terrorism using sentiment analysis and text mining, *Computer Science*, 2018, Vol. 140, pp. 95-103.
2. *Wu K., Zhou M., Lu X. S., et Huang L.* A Fuzzy Logic-Based Text Classification Method for Social Media Data, *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) Banff Center, Banff, Canada, October 5-8-2017*.
3. *Sathe J.B., Mali M.P.* A hybrid Sentiment Classification method using Neural Network and Fuzzy Logic, *11th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*, 2017, pp. 93-96.
4. *Jefferson C., Liu H., Cocea M.* Fuzzy approach for sentiment analysis, *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, 2017, pp. 1-6.

5. Liu H., Cocea M. Fuzzy rule based systems for interpretable sentiment analysis, *Ninth International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI)*, 2017, pp. 129-136.
6. Wang X., Zhang H. et Xu Z. Public Sentiments Analysis Based on Fuzzy Logic for Text, *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*, 2016, Vol. 26, pp. 1341-1360.
7. Ghani, Bajwa I., Ashfaq A. A fuzzy logic based intelligent system for measuring customer loyalty and decision making, *Symmetry*, 2018, 10, pp. 761.
8. Katarya R., Verma O.P. An effective web page recommender system with fuzzy c-mean clustering, *Multimed. Tools Appl.*, 2017, 76, pp. 21481-21496.
9. Nadali S., Murad M.A.A., Kadir R.A. Sentiment classification of customer reviews based on fuzzy logic, *International Symposium in Information Technology (ITSim), IEEE, Kuala Lumpur, Malaysia, 2010*, Vol. 2, pp. 1037-1044.
10. Rahmath P.H., Ahmad T. Fuzzy based sentiment analysis of online product reviews using machine learning techniques, *Int. J. Comput. Appl.*, 2014, 99, pp. 9-16.
11. Dey L., Haque S.M. Opinion mining from noisy text data, *International Journal on Document Analysis and Recognition (IJ DAR)*, 2009, Vol. 12, pp. 205-226.
12. Miao Q., Li Q., Zeng D. Fine-grained opinion mining by integrating multiple review sources, *J. Am. Soc. Inf. Sci. Technol.*, 2010, Vol. 61, pp. 2288-2299.
13. Howellsa K., Ertugan A. Applying fuzzy logic for sentiment analysis of social media network data in marketing, *Procedia Computer Science*, 2017, Vol. 120, pp. 664-670.
14. Jain P., Srivastava A., Singh V. and Hazela B. Aspect based sentiment analysis by fuzzy logic, *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2019, Vol. 9, pp. 243-248.
15. Liu H., Cocea M. Fuzzy rule based systems for interpretable sentiment analysis, *Proceedings Ninth International Conference on Advanced Computational Intelligence*, 2017, pp. 129-136.
16. Bai Y., Wang D. Fundamentals of fuzzy logic control – fuzzy sets, fuzzy rules and defuzzifications, *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications. Advances in Industrial Control*. Springer, 2006, pp. 17-36.
17. Pang B., Lee L. Opinion mining and sentiment analysis, *Foundations and Trends in Information Retrieval*, 2006, Vol. 2, pp. 1-135.
18. Chopra F.K., Bhatia R. Sentiment analyzing by dictionary based approach, *International Journal of Computer Applications*, 2016, Vol. 152, pp. 32-34.
19. Gerasimenko E.M., Stetsenko V.V. Analiz tonal'nosti tekstovykh otzyvov s primeneniem tonal'nykh slovarey i kardinal'nosti nechetkogo mnozhestva [Sentiment analysis of text reviews using tone dictionaries and fuzzy set cardinality], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2022, No. 5, pp. 106-116.
20. Gerasimenko E.M. Intellektual'nyy analiz dannykh. Algoritmy Data Mining: ucheb. posobie [Data mining. Algorithms of data mining: textbook]. Izd-vo YuFU, 2017, 82 p.
21. Pang B., Lee L. A sentimental education: Sentiment analysis using subjectivity summarization based on minimum cuts, *Proceedings of the 42nd annual meeting on Association for Computational Linguistics*, 2004, pp. 271.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Н. Целых.

Герасименко Евгения Михайловна – Южный федеральный университет; e-mail: egerasimenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; к.т.н.; доцент.

Стеценко Валентина Витальевна – e-mail: vstecenko@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

Gerasimenko Evgeniya Michailovna – Southern Federal University; e-mail: egerasimenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone +78634371651; the Department of Computer Aided Design; cand. of eng. sc.; associate professor.

Stetsenko Valentina Vitalievna – e-mail: vstecenko@sfedu.ru; the Department of Computer Aided Design; postgraduate.

А.О. Касьянов, М.В. Потипак

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССОРА ДЛЯ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

Настоящая статья посвящена разработке энергоэффективных реализаций алгоритмов цифровой обработки сигналов в многоканальном радиолокаторе с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов для оценки параметров целей на вычислителях с различной архитектурой. В соответствии общемировой тенденцией рассматривается возможность применения вычислителей с параллельной архитектурой для цифровой обработки широкополосных радиолокационных сигналов. Авторами предложена реализация процедуры обработки отраженного сигнала многоканального радиолокатора с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов с использованием технологии общих вычислений на графических картах (GPGPU). Проведена оценка производительности разработанного решения на различных GPU с разной микроархитектурой. Предложен критерий оценки производительности алгоритма обработки в виде отношения пропускной способности алгоритма к пиковой пропускной способности памяти вычислителя. Проведена численная оценка эффективности использования пропускной способности памяти вычислителя разработанного алгоритма в сравнении с известными реализациями на GPU. Целью работы является обнаружение и оценка параметров целей в реальном масштабе времени с помощью многоканального радиолокатора с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов, используя доступный на рынке вычислитель с минимально возможными массогабаритными характеристиками. Для достижения поставленной цели исследований решены задачи: – выбора и адаптации алгоритмов, позволяющих проводить оценку параметров целей в многоканальном радиолокаторе с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов; – реализации выбранных алгоритмов с учетом архитектуры вычислителя, позволяющих проводить оценку фоновых элементов в реальном масштабе времени; – оценки производительности полученного решения. В процессе разработки алгоритма цифровой обработки сигнала многоканальным радиолокатором с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов проведен анализ нескольких вариантов реализации алгоритма с учетом архитектуры параллельного вычислителя, что позволило выполнить обработку кадра радиоизображения, состоящего из 8 млн. комплексных отсчетов, за время менее 50 мс. на графическом процессоре NVIDIA Jetson AGXXavier. Показана обратная зависимость времени обработки кадра от величины пиковой пропускной способности памяти GPU. Предложен критерий оценки производительности алгоритма обработки. Проведена численная оценка эффективности использования пропускной способности памяти вычислителя разработанного алгоритма в сравнении с известными реализациями на GPU. Выигрыш разработанного алгоритма составляет в среднем 5 раз по сравнению с результатами, полученными другими авторами. По сравнению с ПЛИС реализация двумерного БПФ на GPU оказывается в 17 раз быстрее. Практическая значимость разработанного авторами функционального программного обеспечения не налагает никаких ограничений на количество приемных и передающих каналов и может быть использовано для обработки сигналов в многоканальных радиолокаторах с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов с большим количеством каналов.

Параллельные вычисления; реальный масштаб времени; радиолокатор; технология радиолокационных измерений на основе применения множественных излучающих и множественных приемных каналов; технология общих вычислений на графических картах.

A.O. Kasyanov, M.V. Potipak

USING A GPU FOR REAL-TIME DIGITAL SIGNAL PROCESSING

This paper is devoted to the development of energy-efficient implementations of digital signal processing algorithms in MIMO radar for estimating target parameters on computers with different architectures. In accordance with the global trend, the possibility of using computers with parallel architecture for digital processing of broadband radar signals is being considered. The authors proposed an implementation of the procedure for processing the reflected signal of MIMO radar using the technology of general computing on graphics cards (GPGPU). The performance of the developed solution was assessed on various GPUs

with different microarchitectures. A criterion for evaluating the performance of a processing algorithm is proposed in the form of the ratio of the algorithm's throughput to the peak throughput of the computer's memory. A numerical assessment of the efficiency of using the computer's memory bandwidth of the developed algorithm was carried out in comparison with known implementations on the GPU. The purpose of this work is to detect and evaluate target parameters in real time using MIMO radar, using a commercially available computer with the minimum possible weight and size characteristics. To achieve the set research purpose, the following problems were solved: – selection and adaptation of algorithms that allow the assessment of target parameters in MIMO radar; – implementation of selected algorithms taking into account the architecture of the computer, allowing for an assessment of the target background situation in real time; – assessment of the performance of the resulting solution. In the process of developing an algorithm for digital processing of a MIMO radar signal, several options for implementing the algorithm were analyzed taking into account the architecture of a parallel computer, which made it possible to process a radio image frame consisting of 8 million complex samples in less than 50 ms. by NVIDIA Jetson AGXXavier GPU. The inverse relationship between frame processing time and the peak GPU memory bandwidth is shown. A criterion for evaluating the performance of the processing algorithm is proposed. A numerical assessment of the efficiency of using the computer's memory bandwidth of the developed algorithm was carried out in comparison with known implementations on the GPU. The gain of the developed algorithm is on average 5 times compared to the results obtained by other authors. Compared to an FPGA, implementing 2D FFT on a GPU is 17 times faster. The practical significance of the functional software developed by the authors does not impose any restrictions on the number of receiving and transmitting channels and can be used for signal processing in MIMO radars with a large number of channels.

Radar; algorithm; parallel computing technology; real-time; Multi Input Multi Output (MIMO); digital signal processing; general-purpose computing on graphics processing units (GPGPU).

Введение. В настоящее время вычислительные средства, способные выполнять цифровую обработку широкополосных сигналов в реальном масштабе времени, находятся на этапе активного развития. Из года в год повышается производительность вычислительных средств при снижении их энергопотребления и стоимости.

Повышение производительности обработки информации достигается двумя путями: экстенсивный – повышение тактовых частот, снижение латентности передачи данных и т.п., и интенсивный – за счёт архитектурных решений при построении вычислительных средств. Первый путь близок к исчерпанию своих возможностей ввиду приближения технологических процессов изготовления электронных компонентов к своим физическим пределам.

Второй, основанный на распараллеливании процессов обработки данных, напротив, набирает все большую популярность и успешно развивается. Настоящая популярность параллельных вычислений обусловлена в том числе и наличием специализированных средств разработки программного обеспечения, облегчающих реализацию алгоритмов на вычислителях с параллельной архитектурой. Немаловажным фактором является доступность специализированных библиотек, максимально эффективно реализующих различные математические функции в зависимости от архитектуры вычислителя. Из имеющихся на рынке коммерческих продуктов следует отметить экосистему NVIDIA, имеющую законченные программно-аппаратные решения на базе технологии реализации общих вычислений на графических картах.

Алгоритмы цифровой обработки сигналов в РЛС для оценки параметров цели достаточно хорошо проработаны. Тем не менее, наибольшую сложность представляет поиск энергоэффективных решений для обработки сигналов в многоканальных РЛС с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов, позволяющих использовать широкую номенклатуру недорогих вычислителей.

Обзор текущего состояния способов обработки сигналов в многоканальной РЛС. В работе [1] предложен подход быстрой совместной оценки пеленга и дальности цели на основе нескольких глубоких нейронных сетей для обнаружения целей в сложных условиях. Предложенный алгоритм использует глубокое обучение для достижения точной локализации цели при низком отношении сигнал/шум. Авторы отмечают, что предложенный подход демонстрирует высокую эффективность и точность, однако это достигается при высокой вычислительной нагрузке.

В работах [2, 3] предложен оригинальный способ последовательного формирования матрицы каналов в многоканальной РЛС с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов, позволяющий оценивать дальность до каждой из целей, их скорости и угловые положения целей за одну зондирующую посылку. К достоинствам предложенного подхода можно отнести простоту аппаратной реализации многоканальной РЛС с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов, поскольку используется коммутация одного приемного и одного канала передачи к разным антенным элементам. Недостатком способа является высокая вычислительная нагрузка при оценке параметров целей.

В работе [4] предложен алгоритм оценки угловых координат целей для многоканальной РЛС с непрерывным излучением и пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов. Разработанный алгоритм является производным от MUSIC и использует рандомизированную матричную аппроксимацию для снижения вычислительной сложности при сохранении приемлемой точности. Авторы отмечают, что предложенный подход имеет точность, сравнимую с традиционным алгоритмом MUSIC, только при высоких отношениях сигнал-шум (ОСШ).

В работе [5] предлагается новый алгоритм локализации нескольких целей в азимутальной области для многоканальной РЛС с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов, работающей в режиме непрерывного излучения. Предложенный метод позволяет снизить аппаратную и вычислительную нагрузку за счет использования разреженного массива случайно расположенных передающих и приемных антенных элементов, однако при этом снижается потенциальная разрешающая способность по угловой координате.

В работе [6] проведен обзор подходов для оценки параметров целей в многоканальной РЛС с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов. В работе проводится экспериментальное сравнение различных алгоритмов оценки угловых координат целей, таких как пространственное быстрое преобразование Фурье (БПФ), Capon и MUSIC. Авторы отмечают высокую точность алгоритма MUSIC при высоких отношениях сигнал/шум (ОСШ), однако он требует предварительной оценки количества обнаруженных целей. Анализ приведенных в работе дальностно-азимутальных портретов целей показывает, что максимальная контрастность изображений достигается при использовании классического алгоритма пространственного БПФ, что также подтверждается экспериментальными результатами, приведенными в работе [7].

В работе [8] сообщается о реализации модуля обработки сигналов на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) для РЛС с непрерывным излучением, которая включает в себя вычисление нескольких БПФ для определения дальности, скорости и пеленга целей. Для снижения вычислительной сложности обработки предложены модифицированные алгоритмы оценки скорости и порогового обнаружения.

В работе [9] рассматривается оптимизация стандартных алгоритмов обработки сигналов РЛС с непрерывным излучением с использованием библиотеки Cadence Tensilica для вычислений как с фиксированной, так и с плавающей точкой. Библиотека Cadence Tensilica предназначена для проектирования собственных специализированных вычислителей с последующим изготовлением в виде свербольших интегральных схем (СБИС).

В работах [10, 11] описываются методы обработки 3D данных радиолокационного наблюдения для многоканальной РЛС с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов на графическом процессоре (GPU), реализующие ускорение вычисления трехмерного БПФ. В работе [11] используется высокоуровневая библиотека для ускорения расчетов общего вида на графических ускорителях NVIDIA *ArrayFire*, в то время как в работе [10] использовались библиотека *cuFFT*, входящая в состав NVIDIA CUDA SDK. Предложенные решения позволяют осуществлять обработку отраженных сигналов РЛС в реальном масштабе времени с использованием графической карты NVIDIA RTX A6000 [10] и NVIDIA GeForce RTX 3090 [11].

В работе [12] предложена эффективная реализация БПФ на ПЛИС Xilinx Zynq Ultra Scale+ для обработки радиолокационных сигналов в РЛС с непрерывным излучением. Решение позволяет использовать переменную длину входных данных для расчета БПФ, имеется возможность проводить оконную обработку, накопление, а также расчет амплитуды и фазы отраженного сигнала. Предлагаемая реализация БПФ в 7,32 раза быстрее, чем стандартное IP ядро БПФ Xilinx.

Работа [13] посвящена разработке вычислительного модуля с использованием классического двумерного БПФ для расчета дальностно-скоростного и дальностно-азимутального портретов на ПЛИС (Xilinx).

Проведенный в настоящее время обзор современного состояния подходов к обработке отраженных сигналов в многоканальной РЛС с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов показал, что применяются в основном традиционные алгоритмы: расчет двумерного и трехмерного БПФ для оценки дальности-скорости и дальности-скорости-азимута целей. Это можно объяснить тем, что такие алгоритмы имеют известную временную сложность, и, как правило, готовую реализацию в виде библиотечных модулей, IP-ядер и т.п.

Предложенный Texas Instruments в [14] подход к ЦОС, широко используемый в автомобильных многоканальных РЛС с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов, работающих в режиме непрерывного излучения, с одной стороны, позволяет значительно снизить вычислительную сложность процедуры оценки угловых координат целей, а с другой – имеет существенный недостаток – некогерентное суммирование дальностно-скоростных портретов каждого канала перед процедурой обнаружения, что снижает ОСШ сигналов, отраженных от целей по сравнению с когерентной обработкой.

Большинство современных решений в качестве вычислительной платформы используют ПЛИС, основным недостатком которой является сложность в реализации комплексной процедуры обработки отраженного сигнала ввиду трудоемкости отладки.

Решения, использующие графические карты для обработки сигналов многоканальной РЛС с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов, представлены мощными настольными системами, не всегда подходящими для создания компактных устройств.

Несмотря на достаточно хорошо проработанные подходы обработки отраженных сигналов в многоканальных РЛС с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов и разнообразие алгоритмов, задача разработки эффективных процедур обработки, способных работать в реальном масштабе времени, является актуальной. Разработка подобных процедур сопряжена с необходимостью учитывать особенности архитектуры вычислителя, что в ряде случаев является значимым ограничением в выборе тех или иных алгоритмов обработки.

Целью работы является обнаружение и оценка параметров целей многоканальных РЛС с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов в реальном масштабе времени, используя доступный на рынке вычислитель с минимально возможными массогабаритными характеристиками.

В ходе работы решались следующие задачи:

1. Выбор и адаптация алгоритмов, позволяющих проводить оценку параметров целей в многоканальных РЛС с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов;
2. Реализация выбранных алгоритмов с учетом архитектуры вычислителя, позволяющая проводить оценку фоновых целей обстановки в реальном масштабе времени;
3. Оценка производительности полученного решения.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу в следующей постановке. Пусть в многоканальной РЛС с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов имеется N_{Tx} передающих и N_{Rx} приемных каналов. Приемные антенные элементы располагаются на расстоянии $\lambda/2$ друг от друга, а излучающие – на расстоянии $N_{Rx} \cdot \lambda/2$ [14]. Антенные элементы могут формировать группы приемных и передающих

элементов в двух плоскостях. Имеется четырехканальный трансивер с двумя парами независимых приемопередающих каналов. На базе трансивера строится малогабаритная РЛС ближнего радиуса действия с непрерывным излучением.

На рис. 1 приведено расположение приемных и передающих антенных элементов для $N_{Tx} = 2$, $N_{Rx} = 2$, а также результирующая топология виртуальных антенных элементов.

Такая конфигурация антенной системы позволяет проводить оценку угловых координат цели в азимутальной и угломестной плоскостях.

Пусть имеется вычислитель на графическом процессоре NVIDIA Jetson AGX Xavier 32GB, построенный на микроархитектуре Volta.

Требуется обеспечить выдачу информации о дальности, скорости, а также азимуте и угле места каждой из обнаруженных РЛС целей в реальном масштабе времени.

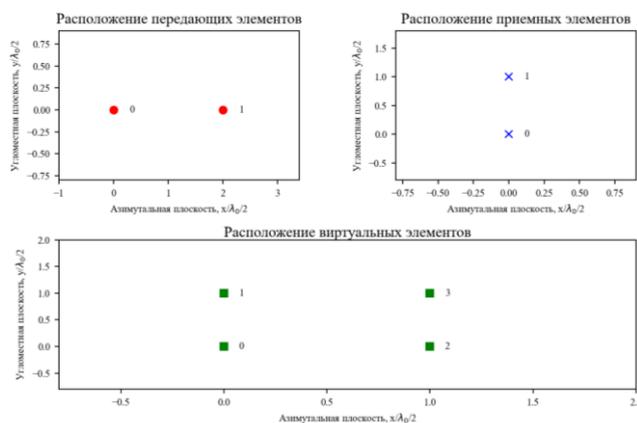


Рис. 1. Топология антенных элементов рассматриваемой РЛС

Каждый из N_{Rx} приемных каналов формирует массив данных, состоящий из $N_t = 512$ отсчетов отраженного сигнала, $L_T = 8192$ периодов зондирования. Каждый кадр, выдаваемый трансивером, содержит $N_t \times L_T \times N_{Rx} = 512 \times 8192 \times 2 \sim 8,4$ млн. комплексных отсчетов с плавающей запятой одинарной точности. Реальный масштаб времени обеспечивается при обработке одного входного кадра данных, поступающего с трансивера, за время не более 50 мс. Таким образом, необходимо обеспечить пропускную способность процедуры обработки отраженного сигнала не менее 1,35 Гбайт/с.

Выбор и адаптация алгоритмов для оценки параметров целей в РЛС. В общем случае, обработку отраженного сигнала в многоканальных РЛС с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов разделяют на три этапа [14]: корреляционная обработка (сжатие по дальности) и получение дальностно-временного портрета; межпериодная обработка сжатых по дальности отсчетов и получение дальностно-скоростного портрета; формирование пространственной характеристики направленности виртуальной антенной решетки по амплитудно-фазовому распределению тока на её элементах. На рис. 2 представлена последовательность обработки отсчетов отраженного сигнала, а на рис. 3 – укрупненный алгоритм обработки отраженного сигнала. Ключевой особенностью РЛС данного класса является необходимость ортогонального разделения зондирующих сигналов, излучаемых каждым из передающих элементов. Известны различные способы разделения сигналов, по частоте, времени, кодовой последовательности, разделение по поляризации и т.п. [6, 14]. При разработке данной РЛС было использовано разделение по частоте Доплера зондирующих сигналов её передающих элементов [15].

В течение зондирующей посылки комплексные отсчеты отраженного сигнала накапливаются в буфере, находящемся в ОЗУ вычислителя, формируя кадр (шаг 1 алгоритма, приведенного на рис. 3). Поскольку отсчеты сигнала на выходе трансивера имеют тип

данных *int16*, а дальнейшие вычисления используют числа с плавающей запятой одинарной точности *float32*, необходимо провести преобразование типов входных данных. Для согласования порядка следования отсчетов каналов приемника и порядка, принятого в процедуре обработки, необходимо выполнить их упорядочивание (шаг 2 алгоритма обработки, приведенного на рис. 3).

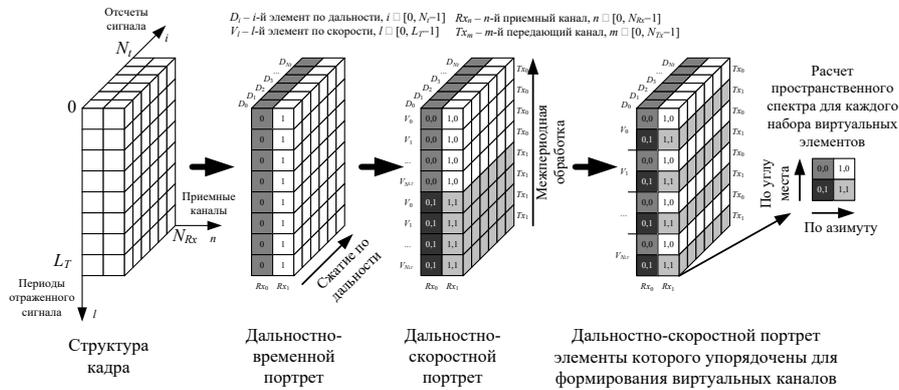


Рис. 2. Обработка отраженного сигнала в рассматриваемой РЛС



Рис. 3. Укрупненная блок-схема алгоритма обработки отраженного сигнала в рассматриваемой РЛС

Такое упорядочивание данных необходимо для эффективной работы контроллера памяти вычислителя и позволяет использовать линейный доступ к данным на последующих этапах обработки [16]. Упорядочивание данных выполнялась с помощью собственной функции ядра, написанной на CUDA C. После процедуры упорядочивания, буфер в ОЗУ вычислителя содержит данные, подготовленные для выполнения процедуры оптимальной обработки (сжатия по дальности).

Следующим этапом обработки является получение дальностно-временного портрета (см. рис. 2) посредством выполнения процедуры корреляционной обработки (сжатие по дальности) накопленных периодов отраженного сигнала. Каждая l -я строка дальностно-временного портрета \dot{J}_l представляет собой свертку l -го периода отраженного сигнала \dot{S}_l с коэффициентами согласованного фильтра в частотной области

$$\dot{J}_{l,n} = F_{\langle N_t \rangle}^{-1} \left\{ F_{\langle N_t \rangle} \left\{ \dot{S}_{l,n} \right\} \times C_{MF} \right\}, \quad (1)$$

где $l = [0, L_T - 1]$ – индекс периода принятого сигнала, $n = [0, N_{Rx} - 1]$ – индекс приемного канала, $F_{\langle m \rangle}$, $F_{\langle m \rangle}^{-1}$ – символ прямого и обратного преобразования Фурье вдоль размерности кадра m , C_{MF} – дискретизированная передаточная функция согласованного фильтра (СФ), или частотные коэффициенты СФ.

Для вычисления преобразований Фурье использовалась библиотека *cuFFT*, входящая в состав NVIDIA CUDA SDK. Особенностью шага 3 алгоритма обработки, приведенного на рис. 3, является возможность интерполяции получаемого дальностного портрета. Интерполяция производится в частотной области, непосредственно перед обратным преобразованием Фурье. Далее выполняется межпериодное сжатие по скорости (шаг 4 алгоритма обработки, приведенного на рис. 3) для расчета дальностно-скоростного портрета (см. рис. 2). Каждый i -й столбец дальностно-скоростного портрета \dot{G}_i представляет собой прямое преобразование Фурье i -х столбцов дальностно-временного портрета по всем периодам зондирования

$$\dot{G}_{i,n} = F_{\langle L_T \rangle} \left\{ \dot{J}_{i,n} \right\}, \quad (2)$$

где $i = [0, N_t - 1]$ – индекс, соответствующий номеру отсчета принятого сигнала.

Поскольку используется разделение каналов передачи по частоте Доплера, дальностно-скоростной портрет каждого приемного канала разделяется на N_{Tx} равных участков по строкам (периодам зондирования). Таким образом, первые $\lfloor L_T / N_{Tx} \rfloor$ строк дальностно-скоростного портрета первого приемного канала, где $\lfloor arg \rfloor$ – означает округление аргумента arg до ближайшего целого в меньшую сторону, будут иметь периоды отраженного сигнала, полученные в ходе зондирования первым передающим каналом, вторые $\lfloor L_T / N_{Tx} \rfloor$ строки будут иметь периоды отраженного сигнала, полученные в ходе зондирования вторым передающим каналом и т.д. Возвращаясь к рис. 2 следует отметить, что на нём участки дальностно-скоростных портретов, принадлежащие различным комбинациям приемных и передающих каналов, выделены различными оттенками серого цвета.

Для вычисления диаграмм отражения целей в азимутальной и угломестной плоскостях необходимо произвести предварительную перестановку элементов дальностно-скоростного портрета \dot{G} с учетом координат мест расположения виртуальных каналов, как это показано на рис. 2. Упорядочивание данных выполняется собственной функцией ядра, написанной на CUDA C (шаг 5 алгоритма обработки, приведенного на рис. 3). В результате перестановок формируется матрица \dot{G}' , содержащая амплитудно-фазовые распределения виртуальных каналов рассматриваемой РЛС. Для формирования характеристик направленности итоговой виртуальной антенной решетки в двух плоскостях выполняется прямое двумерное преобразование Фурье (шаг 6 алгоритма обработки, приведенного на рис. 3).

Каждый элемент матрицы A представляет собой трехмерную комплекснозначную диаграмму направленности для каждой строки и столбца преобразованного дальностно-скоростного портрета \dot{G}'

$$A_{i,l} = F_{\langle N_{Tx} \rangle} \left\{ F_{\langle N_{Rx} \rangle} \left\{ \dot{G}'_{i,l} \right\} \right\}. \quad (3)$$

Для вычисления двумерного преобразования Фурье используется библиотека *cuFFT*. При дальнейшей цифровой обработке принятого сигнала матрица $A_{i,l}$, найденная в результате преобразования Фурье, рассматривается как некий единый элемент, представляющий набор виртуальных излучателей антенной решетки для i -го отсчета по дальности и l -го отсчета по скорости (см. рис. 2).

Для диагностики состояния виртуальных каналов в процессе эксплуатации рассматриваемой РЛС выполняется поиск максимума амплитуды отраженного сигнала в каждом виртуальном канале (шаг 7 алгоритма обработки, приведенного на рис. 3). Реализация поиска использует модифицированную функцию ядра [5].

В работах [6–8, 10, 14] для обнаружения целей используется обнаружитель с постоянной вероятностью ложных тревог (CFAR). Авторы указанных работ отмечают высокую вычислительную сложность такого подхода, поэтому обнаружение целей в разработанной нами РЛС проводится на основе традиционной пороговой обработки сигналов, принимаемых рассматриваемой РЛС. Для корректного выбора порога обнаружения требуется знание уровня шума, который определяется по гистограмме распределения амплитуд отраженного сигнала, рассчитываемой индивидуально для каждого кадра (шаг 8 алгоритма обработки, приведенного на рис. 3). Для вычисления гистограммы используется модифицированный алгоритм приведения [18].

После определения порога обнаружения выполняется поиск элементов $A_{i,l}$ (выражение (3)), амплитуды которых превышают заданный порог обнаружения. Поскольку реальные цели являются распределенными, то цель обычно содержит от нескольких десятков до сотен элементов $A_{i,l}$. Применение алгоритма кластеризации [19] позволяет группировать обнаруженные элементы $A_{i,l}$ в кластеры и отождествлять обнаруженные кластеры целям в кадре (шаг 9 алгоритма обработки, приведенного на рис. 3).

Для повышения точности оценки угловых координат, по выражению (3) рассчитываются интерполированные характеристики направленности элементов $A_{i,l}$, превышающих порог обнаружения (шаг 10 алгоритма обработки, приведенного на рис. 3). Производится статистическая обработка каждого кластера, составленного из элементов $A_{i,l}$, для формирования дополнительной информации о цели, которая может быть использована для последующей классификации [20].

Результатом работы алгоритма обработки, приведенного на рис. 3, является список обнаруженных целей в кадре и их параметры (амплитуда отраженного сигнала, дальность, скорость, азимут и угол места). К дополнительным параметрам цели относится количество элементов $A_{i,l}$, амплитуды которых превысили порог обнаружения в каждом кластере, отождествленном с целью, среднее значение и СКО размеров цели по дальности, скорости, угловым координатам.

Экспериментальная оценка вычислительной производительности. В соответствии с алгоритмом обработки отраженного сигнала в рассматриваемой РЛС, приведенным на рис. 3, разработано функциональное программное обеспечение (ФПО) и проведена оценка производительности алгоритма обработки отраженного сигнала данной РЛС по каждому этапу обработки. В оценке производительности вычислительной системы рассматриваемой РЛС, помимо предлагаемого вычислителя, принимали участие несколько видеокарт, имеющихся в распоряжении авторов. Участники тестирования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименования и параметры видеокарт, использованных для тестирования

Модель вычислителя	Год начала выпуска	Микроархитектура	Пиковая пропускная способность памяти, Гбайт/с	Тактовая частота процессора, МГц
NVIDIA GeForce GTX 950	2015	Maxwell	105,76	1024
NVIDIA Jetson AGX Xavier 32GB	2018	Volta	88,128	854
NVIDIA GeForce GTX 1650 SUPER	2019	Turing	192,00	1485

В табл. 2 представлены усреднённые результаты замеров времени выполнения разработанной реализации алгоритма обработки отраженного сигнала рассматриваемой РЛС для одного и того же кадра данных радиолокационного наблюдения. Функциональное программное обеспечение компилировалось под конкретную вычислительную платформу компилятором *nvcc*, входящим в состав NVIDIA CUDA SDK.

Таблица 2

Сравнение производительности видеокарт, использованных для тестирования

№ п/п	Вычислительный этап	Время выполнения, мс		
		GTX 950	Jetson AGX Xavier	GTX 1650 SUPER
1.	Упорядочивание данных и преобразование типов (512×8192×2 комплексных отсчетов)	7,509	6,109	12,403
2.	Оптимальная обработка отраженного сигнала, сжатие по дальности	14,594	16,155	8,193
2.1	Прямое преобразование Фурье (512×8192×2 комплексных отсчетов)	1,652	2,252	0,842
2.2	Перемножение с комплексными отсчетами согласованного фильтра (512×8192×2 комплексных отсчетов)	1,545	1,567	0,812
2.3	Обратное преобразование Фурье с интерполяцией 8 (512×8×8192×2 комплексных отсчетов)	11,397	12,336	6,539
3.	Межпериодная обработка отраженного сигнала, сжатие по скорости	5,66	8,031	2,625
3.1	Транспонирование (256×8192×2 комплексных отсчетов)	1,952	4,307	0,742
3.2	Прямое преобразование Фурье (256×8192×2 комплексных отсчетов)	1,671	2,345	1,319
3.3	Транспонирование (256×8192×2 комплексных отсчетов)	2,037	1,379	0,564
4.	Упорядочивание данных для формирования амплитудно-фазового распределения (256×8192×2 комплексных отсчетов)	1,078	0,881	0,410
5.	Расчет характеристик направленностей виртуальной антенной решетки	8,014	9,792	3,511
5.1	Транспонирование (256×8192×2 комплексных отсчетов)	1,952	4,279	0,742
5.2	Прямое двумерное преобразование Фурье (256×8192×2 комплексных отсчетов)	4,021	4,365	2,207
5.3	Транспонирование (256×8192×2 комплексных отсчетов)	2,041	1,148	0,562
6.	Поиск максимума амплитуды в каждом виртуальном канале (256×8192×2 комплексных отсчетов)	0,668	0,501	0,219
7.	Вычисление гистограммы и определение порога обнаружения (256×8192×2 комплексных отсчетов)	0,894	0,826	0,996
8.	Обнаружение и кластеризация целей	3,321	2,424	1,082
8.1	Пороговая обработка 256×8192×2 комплексных отсчетов)	1,737	1,141	0,463

8.2	Разметка отсчетов, превысивших порог обнаружение (256×8192×2 комплексных отсчетов)	1,028	0,868	0,384
8.3	Кластеризация отсчетов, превысивших порог обнаружение (256×8192×2 комплексных отсчетов)	0,345	0,277	0,155
8.4	Сбор дополнительной статистики по полученным кластерам (256×8192×2 комплексных отсчетов)	0,211	0,138	0,080
9.	Интерполяция угловых координат обнаруженных целей	3,026	2,524	2,202
9.1	Подготовка ММО-элементов (709×2×2 комплексных отсчетов)	0,009	0,009	0,006
9.2	Прямое двумерное преобразование Фурье с интерполяцией 32×16 (709×64×32 комплексных отсчетов)	3,017	2,515	2,196
Итого:		44,764	47,244	31,640

Как видно из табл. 2, на предлагаемом к применению вычислителе NVIDIA Jetson AGX Xavier 32GB удалось добиться обработки кадра радиолокационных данных, получаемых от данной РЛС, за время менее 50 мс.

Включение в тест доступных графических карт NVIDIA GeForce GTX 950 и NVIDIA GeForce GTX 1650 SUPER позволяет наглядно показать зависимость производительности разработанного алгоритма обработки сигнала на разных микроархитектурах GPU. Известно [21], что GPU имеет высокую латентность при обращениях в глобальную память, что в общем случае ограничивает скорость обработки данных на GPU. Итоговые результаты, приведенные в табл. 2, наглядно демонстрируют уменьшение времени расчета в зависимости от увеличения пропускной способности памяти GPU. Таким образом, пропускная способность памяти является удобной метрикой для прогнозирования производительности вычислительных алгоритмов на разных моделях GPU.

В работе [12] предложена реализация двумерного преобразования Фурье на ПЛИС. В тоже время в таблице 4, приведенной в работе [12], показано, что двумерное БПФ размерностью $2048 \times 2048 = 4$ млн. комплексных отсчетов (плавающая запятая с одинарной точностью) на ПЛИС Xilinx Zynq Ultra Scale+ выполняется примерно за 168 мс. В тоже время, вычисление двумерного БПФ такой же размерности $256 \times 8192 \times 2 = 4$ млн. комплексных отсчетов на NVIDIA Jetson AGX Xavier 32GB занимает всего около 9,8 мс (см. пятую строку табл. 2). Очевидно, что вычисление БПФ на предлагаемой к применению GPU NVIDIA Jetson AGX Xavier 32GB происходит примерно в 17 раз быстрее, нежели с помощью ПЛИС Xilinx Zynq Ultra Scale+. Транспонирование данных перед вычислением БПФ необходимо для организации эффективного доступа к данным, хранящимся в глобальной памяти GPU.

В работах [10, 11] приведены результаты замеров производительности разработанных алгоритмов обработки сигналов аналогичных РЛС на GPU, позволяющие провести сравнение их эффективности с алгоритмом, предложенным в настоящей работе.

В качестве критерия сравнения алгоритмов предлагается использовать отношение пропускной способности алгоритма B_a , отнесенной к пиковой пропускной способности памяти B вычислителя, на котором осуществлялся его запуск.

Расчетное соотношение для определения пропускной способности алгоритма B_a имеет вид

$$B_a = N_s C_s / T_p, \quad (4)$$

где N_s – количество комплексных отсчетов, шт.; C_s – объем одного комплексного отсчета, байт; T_p – время обработки одного кадра, состоящего из N_s отсчетов, мс.

В табл. 3 приведены значения пропускной способности различных вариантов реализации алгоритма цифровой обработки отраженного сигнала в рассматриваемой РЛС, рассчитанные с помощью соотношения (4).

Таблица 3

**Сравнение эффективности алгоритма цифровой обработки сигналов
на тестируемых видеокάρтах в радиолокаторах с пространственным разнесением
передающих и приемных групп антенных элементов**

Наименование параметра	RTX A6000	GeForce RTX 3090	Jetson AGX Xavier
Размерность кадра данных	8×8×256×1024	8000×32×4×64	512×8192×2
Количество комплексных отсчетов N_s , шт	16 777 216	65 536 000	8 388 608
Время обработки одного кадра T_p , мс	49,67	371,9	47,244
Объем одного комплексного отсчета C_s , байт	8	8	8
Пропускная способность алгоритма обработки, V_a Гбайт/с	2,7	1,41	1,42
Пиковая пропускная способность памяти B , Гбайт/с	768	935,8	88,128
Эффективность использования пропускной способности памяти вычислителя алгоритмом обработки V_a/B , %	0,35	0,15	1,61
Проигрыш в эффективности известных алгоритмов предложенному авторами, раз	4,6	10,73	1

Как видно из табл. 3, нами предложена наиболее эффективная реализация цифровой обработки сигналов РЛС данного класса с точки зрения максимально полного использования пропускной способности памяти вычислителя. При этом следует заметить, что полученная нами оценка эффективности использования пропускной способности памяти вычислителя алгоритма обработки отраженного сигнала рассматриваемой РЛС является приближенной. Тем не менее, предложенный критерий сравнения данного алгоритма ЦОС с известными алгоритмами является универсальной метрикой для прогнозирования производительности вычислительных алгоритмов цифровой обработки сигнала в многоканальных РЛС с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов.

Заключение. При разработке алгоритма цифровой обработки сигнала в РЛС с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов выполнен сравнительный анализ различных вариантов его практической реализации с учётом архитектуры применяемого параллельного вычислителя. Варианты реализации алгоритма ЦОС выбирались с учётом необходимости выполнения требования обеспечения линейного доступа к данным в глобальной памяти применяемого вычислителя. При рассмотрении возможных вариантов практической реализации вычислительного алгоритма ЦОС в РЛС данного класса предполагалось, что число используемых внутренних буферов памяти должно быть минимальным. Предпринятые меры позволили выполнить обработку кадра, состоящего из 8,4 млн. комплексных отсчетов, за время менее 50 мс на графическом процессоре NVIDIA Jetson AGX Xavier, что удовлетворяет требованию по функционированию подсистемы обработки в реальном масштабе времени.

Показана обратно пропорциональная зависимость времени обработки кадра от величины пиковой пропускной способности памяти GPU. Предложен критерий оценки производительности алгоритма обработки в виде отношения пропускной способности алгоритма V_a к пиковой пропускной способности памяти B вычислителя. Проведена численная оценка эффективности использования пропускной способности памяти вычислителя разработанного алгоритма в сравнении с известными реализациями на GPU. Выигрыш по времени обработки для разработанного алгоритма в среднем составляет в среднем до 5 раз по сравнению с результатами, полученными ранее для ЦОС на графических процессорах (см., например, работы [10] и [11]). При этом показано, что по сравнению с ПЛИС реализация двумерного БПФ на GPU оказывается в 17 раз быстрее.

Дальнейшее увеличение производительности разработанного алгоритма цифровой обработки сигнала в РЛС с пространственным разнесением передающих и приемных групп антенных элементов возможно за счет отказа от ряда операций транспонирования, которые были введены на этапе отладки для обеспечения линейного доступа к данным, хранящимся в глобальной памяти вычислителя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Su Y., et al.* Fast Target Localization in FMCW-MIMO Radar with Low SNR and Snapshot via Multi-Deep Net // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 15, No. 1. – P. 1-21.
2. *Лобач В.Т., Касьянов А.О., Потупак М.В., Суматохин К.В.* Особенности цифрового формирования диаграммы направленности МИМО-радар // *Антенны*. – 2016. – № 7. – С. 47-52.
3. *Lobach V., Kas'yanov A., Potipak M.* Digital beam forming in MIMO-radar with frequency diversity // 2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). IEEE. 14-17 Oct. 2016. – P. 1-4.
4. *Karim B.A., Ali H.K.* Computationally efficient MUSIC based DOA estimation algorithm for FMCW radar // *Journal of Electronic Science and Technology*. – 2023. – Vol. 21, No. 1. – P. 1-18.
5. *Singh H., Chattopadhyay A.* Multi-target Range and Angle detection for MIMO-FMCW radar with limited antennas // *arXiv preprint arXiv:2302.14327*. – 2023.
6. *Grove R.L.* MIMO radar Systems and Algorithms-Imperfections and Calibration. Copenhagen. – Technical University of Denmark, 2022. – 189 p.
7. *Patrick D., Huang Y., Brennan P.W.* FMCW based MIMO imaging radar // *ARMMS Conference*. 7-8 Apr. 2014. – Vol. 1. – P. 12-34.
8. *Eugin H., Lee J.* Hardware architecture design and implementation for FMCW radar signal processing algorithm // *Proceedings of the 2014 Conference on Design and Architectures for Signal and Image Processing*. IEEE. 8-10 Oct. 2014. – P. 1-6.
9. *Fixed-Point and Floating-Point FMCW Radar Signal Processing with Tensilica DSPs* // White paper. 2022. – URL: https://www.cadence.com/content/dam/cadence-www/global/en_US/documents/tools/ip/tensilica-ip/tip-fmcw-radar-wp.pdf.
10. *Pitre E. et al.* Comparison of massively parallel algorithms on graphics processing unit for MIMO radar // *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. – 2022. – Vol. 2. – P. 1-9.
11. *Liu G. et al.* A GPU based real time processing system for frequency division multiple input multiple output radar // *IET Radar, Sonar & Navigation*. – 2023. – Vol. 17, No. 10. – P. 1524-1537.
12. *Heo J. et al.* FPGA implementation of an efficient FFT processor for FMCW radar signal processing // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21, No. 19. – P. 1-16.
13. *Damjanović V.D., Petrović M.L., Milovanović V. M.* On Hardware Implementations of Two-Dimensional Fast Fourier Transform for Radar Signal Processing // *IEEE EUROCON 2023-20th International Conference on Smart Technologies*. 6-8 Jul. 2023. – P. 400-405.
14. *Texas Instruments.* MIMO radar // *Application Report SWRA554*. – 2018.
15. *Doerry A.W.* SAR ambiguous range suppression // Report SAND2006-5332. Sandia National Laboratories (SNL). Albuquerque, NM. and Livermore, CA (United States). – 2006.
16. *Harris M.* How to Access Global Memory Efficiently in CUDA C/C++ Kernels // *Parallel Forall*. NVIDIA Corporation. 2013. – URL: <https://developer.nvidia.com/blog/how-access-global-memory-efficiently-cuda-c-kernels/>.
17. *Luitjens J.* Faster parallel reductions on Kepler // *Parallel Forall*. NVIDIA Corporation. – 2014. – URL: <https://devblogs.nvidia.com/faster-parallel-reductions-kepler>.
18. *Sakharnykh N.* GPUPro Tip: Fast histograms using shared atomics on Maxwell // *Parallel Forall*. NVIDIA Corporation. – 2015. – URL: <https://developer.nvidia.com/blog/gpu-pro-tip-fast-histograms-using-shared-atomics-maxwell/>.
19. *Kalentev O. et al.* Connected component labeling on a 2D grid using CUDA // *Journal of Parallel and Distributed Computing*. – 2011. – Vol. 71, No. 4. – P. 615-620.
20. *Касьянов А.О., Потупак М.В., Евтушенко А.Н.* Идентификация радиолокационной станции на основе анализа непреднамеренной внутриимпульсной модуляции // *Радиотехника*. – 2023. – Т. 87, № 2. – С. 73-83.
21. *Jia Z. et al.* Dissecting the NVidia Turing T4 GPU via microbench marking // *arXiv preprint arXiv:1903.07486*. – 2019.

REFERENCES

1. *Su Y., et al.* Fast Target Localization in FMCW-MIMO Radar with Low SNR and Snapshot via Multi-Deep Net, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 15, No. 1, pp. 1-21.
2. *Lobach V.T., Kas'yanov A.O., Potipak M.V., Sumatokhin K.V.* Osobennosti tsifrovogo formirovaniya diagrammy napravlenosti MIMO-radara [Features of digital beamforming of MIMO radar], *Antenny* [Antennas], 2016, No. 7, pp. 47-52.

3. Lobach V., Kasyanov A., Potipak M. Digital beam forming in MIMO-radar with frequency diversity, *2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. IEEE. 14-17 Oct. 2016, pp. 1-4.
4. Karim B.A., Ali H.K. Computationally efficient MUSIC based DOA estimation algorithm for FMCW radar, *Journal of Electronic Science and Technology*, 2023, Vol. 21, No. 1, pp. 1-18.
5. Singh H., Chattopadhyay A. Multi-target Range and Angle detection for MIMO-FMCW radar with limited antennas, *arXiv preprint arXiv:2302.14327*, 2023.
6. Grove R.L. MIMO radar Systems and Algorithms-Imperfections and Calibration. Copenhagen. Technical University of Denmark, 2022, 189 p.
7. Patrick D., Huang Y., Brennan P.W. FMCW based MIMO imaging radar, *ARMMS Conference*. 7-8 Apr. 2014, Vol. 1, pp. 12-34.
8. Eugin H., Lee J. Hardware architecture design and implementation for FMCW radar signal processing algorithm, *Proceedings of the 2014 Conference on Design and Architectures for Signal and Image Processing*. IEEE. 8-10 Oct. 2014, pp. 1-6.
9. Fixed-Point and Floating-Point FMCW Radar Signal Processing with Tensilica DSPs, *White paper*. – 2022. Available at: https://www.cadence.com/content/dam/cadence-www/global/en_US/documents/tools/ip/tensilica-ip/tip-fmcw-radar-wp.pdf.
10. Pitre E. et al. Comparison of massively parallel algorithms on graphics processing unit for MIMO radar, *e-Prime-Advances in Electrical Engineering. Electronics and Energy*, 2022, Vol. 2, pp. 1-9.
11. Liu G. et al. A GPU based real time processing system for frequency division multiple input multiple output radar, *IET Radar. Sonar & Navigation*, 2023, Vol. 17, No. 10, pp. 1524-1537.
12. Heo J. et al. FPGA implementation of an efficient FFT processor for FMCW radar signal processing, *Sensors*, 2021, Vol. 21, No. 19, pp. 1-16.
13. Damjanović V.D., Petrović M.L., Milovanović V. M. On Hardware Implementations of Two-Dimensional Fast Fourier Transform for Radar Signal Processing, *IEEE EUROCON 2023-20th International Conference on Smart Technologies*. 6-8 Jul. 2023, pp. 400-405.
14. Texas Instruments. MIMO radar, *Application Report SWRA554*, 2018.
15. Doerry A.W. SAR ambiguous range suppression, *Report SAND2006-5332*. Sandia National Laboratories (SNL). Albuquerque. NM. and Livermore. CA (United States), 2006.
16. Harris M. How to Access Global Memory Efficiently in CUDA C/C++ Kernels, *Parallel Forall. NVIDIA Corporation*, 2013. Available at: <https://developer.nvidia.com/blog/how-access-global-memory-efficiently-cuda-c-kernels/>.
17. Luitjens J. Faster parallel reductions on Kepler, *Parallel Forall. NVIDIA Corporation*, 2014. Available at: <https://devblogs.nvidia.com/faster-parallel-reductions-kepler>.
18. Sakharnykh N. GPUPro Tip: Fast histograms using shared atomics on Maxwell, *Parallel Forall. NVIDIA Corporation*, 2015. Available at: <https://developer.nvidia.com/blog/gpu-pro-tip-fast-histograms-using-shared-atomics-maxwell/>.
19. Kalentev O. et al. Connected component labeling on a 2D grid using CUDA, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2011, Vol. 71, No. 4, pp. 615-620.
20. Kas'yanov A.O. Potipak M.V., Evtushenko A.N. Identifikatsiya radiolokatsionnoy stantsii na osnove analiza neprednamerennoy vnutriimpul'snoy modulyatsii [Identification of a radar station based on the analysis of unintentional intrapulse modulation], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2023, Vol. 87, No. 2, pp. 73-83.
21. Jia Z. et al. Dissecting the NVidia Turing T4 GPU via microbench marking, *arXiv preprint arXiv:1903.07486*, 2019.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.И. Турулин.

Касьянов Александр Олегович – Южный федеральный университет; e-mail: kasyanovao@sfedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; д.т.н.; профессор.

Потипак Михаил Владимирович – e-mail: potipak@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; Научно-исследовательский институт робототехники и процессов управления; к.т.н.; с.н.с.

Kasyanov Alexander Olegovich – Southern Federal University; e-mail: kasyanovao@sfedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; the Department of Radio Engineering and Telecommunication Systems; dr. of eng. sc.; professor.

Potipak Mikhail Vladimirovich – e-mail: potipak@sfedu.ru; Taganrog, Russia; Scientific and technological laboratory “Designing on-board systems of robotic complexes”; cand. of eng.; senior researcher.

П.Г. Криницин, С.В. Ченцов

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ СМАЗКИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ КЛАССИФИКАЦИИ

Целью данной работы является решение проблемы внеплановых отказов подшипников качения, установленных на промышленном оборудовании, в результате их неправильного обслуживания в процессе эксплуатации. Известно, что до 50% всех внеплановых простоев промышленного оборудования происходит по причине разрушения подшипников. При этом основной причиной отказа подшипников являются нарушения режима смазки тел качения: избыточное и недостаточное количество смазочных материалов. Эти причины составляют до 36% от общего числа отказов подшипников. В процессе эксплуатации оборудования выявить и предупредить все проблемы со смазкой подшипников очень сложно, по причине большого разнообразия факторов, влияющих на их возникновение. Поэтому, актуальной задачей для исследования, становится разработка автоматизированной рекомендательной системы для управления сервисным обслуживанием промышленного оборудования, с контролем смазки подшипниковых узлов. В работе рассматривается метод классификации состояний подшипников в зависимости от их диагностических параметров: показателей виброскорости, виброускорения и температуры. С этой целью применяются алгоритмы классического машинного обучения: модели KNN, RandomForestClassifier и SVM. Для каждой модели определяются гиперпараметры, позволяющие достигать максимальных результатов во время обучения. В процессе проведения исследования выполнен анализ влияния каждого из диагностических параметров – признаков на показатели работы модели классификации. Понимание, какой показатель работы подшипника будет наиболее важным, позволит выбирать приборы контроля состояния оборудования на производственном предприятии осознанно, для решения конкретных производственных задач. Разработанный алгоритм позволяет качественно, с 98% точностью, производить оценку состояния смазки подшипников качения и выдавать рекомендации по проведению своевременного сервисного обслуживания оборудования. Модель - классификатор планируется использовать в составе комплекса по контролю за техническим состоянием оборудования, расширяя возможности диагностики: помимо сведений о вероятности отказа оборудования и прогнозных сроках службы, комплекс диагностики, совмещенный с предлагаемой моделью, позволит воздействовать на ходимость подшипников, путем улучшения качества их смазки.

Классификация; машинное обучение; метод опорных векторов SVM; случайный лес RFC; k-ближайших соседей KNN; точность; подшипник; смазка.

P.G. Krinitsin, S.V. Chentsov

ASSESSMENT OF THE LUBRICATION CONDITION OF ROLLING BEARINGS USING CLASSIFICATION ALGORITHMS

The purpose of this work is to solve the problem of unscheduled failures of rolling bearings installed on industrial equipment as a result of their improper maintenance during operation. It is known that up to 50% of all unscheduled downtime of industrial equipment occurs due to bearing failure. In this case, the main reason for bearing failures is violations of the lubrication regime of the rolling elements: excessive and insufficient quantities of lubricants. These reasons account for up to 36% of the total number of bearing failures. During equipment operation, it is very difficult to identify and prevent all problems with bearing lubrication, due to the wide variety of factors influencing their occurrence. Therefore, an urgent task for research is the development of an automated recommendation system for managing the maintenance of industrial equipment, with control of the lubrication of bearing units. The paper discusses a method for classifying the states of bearings depending on their diagnostic parameters: indicators of vibration velocity, vibration acceleration and temperature. For this purpose, classical machine learning algorithms are used: KNN, RandomForestClassifier and SVM models. For each model, hyperparameters are determined to achieve maximum results during training. In the process of conducting the study, an analysis of the influence of each of the diagnostic parameters - signs on the performance of the classification model was carried out. Understanding which indicator of bearing performance will be the most important will allow you to choose equipment condition monitoring devices at a manufacturing enterprise consciously, to solve specific production problems. The developed algorithm allows us to qualitatively, with 98% accuracy,

assess the lubrication condition of rolling bearings and issue recommendations for timely maintenance of equipment. The classifier model is planned to be used as part of a complex for monitoring the technical condition of equipment, expanding diagnostic capabilities: in addition to information about the probability of equipment failure and predicted service life, the diagnostic complex, combined with the proposed model, will allow influencing the mileage of bearings by improving the quality of their lubrication.

Classification; machine learning; Support Vector Machine (SVM) method; Random Forest Classifier (RFC); k-nearest neighbors (KNN); accuracy; bearing; lubrication.

Введение. По данным современных исследований, до 40% прибыли теряет в среднем промышленное предприятие на устранение последствий внеплановых простоев оборудования [1]. Учитывая, что состояние смазки подшипников играет в этих простоях доминирующую роль, необходимо обеспечить непрерывный контроль за её наличием в достаточном количестве в процессе эксплуатации. Смазка в подшипнике выполняет следующие функции [2]:

1. Образует между рабочими поверхностями упругую гидродинамическую пленку, защищающую тела качения, кольца и сепаратор от повреждений [3].
2. Снижает трение скольжения между телами качения подшипника.
3. Защищает подшипник от попадания загрязнений и образования коррозии;
4. Способствует эффективному охлаждению подшипника, способствуя распределению тепла.

Проблемы со смазкой в подшипниках возникают по различным причинам. Большое влияние оказывает человеческий фактор при проведении технического обслуживания оборудования. Оператор, производящий обслуживание, может нарушить регламент проведения смазки, восполняя ее недостаток в подшипнике в не регламентированных объемах или с не правильной периодичностью. При недостаточном количестве смазки в подшипнике увеличивается трение в подвижных элементах, происходит рост температуры, изменение рабочих зазоров между вращающимися телами [4, 5]. Что грозит полным разрушением подшипника и остановкой оборудования. При избыточном количестве смазки повышается сопротивление вращению элементов подшипника, создается избыточное давление что приводит к выходу из строя уплотнительной манжеты подшипника и попаданию загрязнений внутрь детали. В результате срок службы подшипника сокращается и становится трудно прогнозировать его остаточный ресурс по причине нелинейности протекающих в нем деструктивных процессов.

Немаловажное значение имеют и различные технические отклонения в работе оборудования (нарушена проходимость маслопровода, пресс-масленки подшипника из-за загрязнения технологической пылью), в результате чего подача смазки к подшипнику становится фактически невозможна. К организационным проблемам относятся те случаи, когда действующие на предприятиях нормативы по смазке оборудования уже не соответствуют реалиям производства, например в связи с изменением фактической производительности оборудования или условий его эксплуатации.

В последние два года наблюдается проблема, связанная с нестабильным качеством самих подшипников. Многие крупнейшие производители подшипниковой продукции покинули российский рынок: SKF, Timken и др., что связано с санкционной политикой иностранных производителей. По состоянию на 2009 г. соотношение производителей подшипников на мировом рынке представлено на рис. 1 [6]. Аналоги подшипников других производителей не всегда отличаются постоянством эксплуатационных свойств, в результате чего возникает потребность корректировать периодичность смазки оборудования для обеспечения приемлемого срока службы подшипниковых узлов.

Вышеизложенные обстоятельства объясняют потребность в разработке инструмента, позволяющий производить круглосуточный контроль за работой оборудования с автоматизацией процесса выдачи рекомендаций о проведении сервисного обслуживания подшипниковых узлов.

В статье будет рассмотрен процесс обучения модели классификации состояний подшипников, по результатам оценки их диагностических параметров.

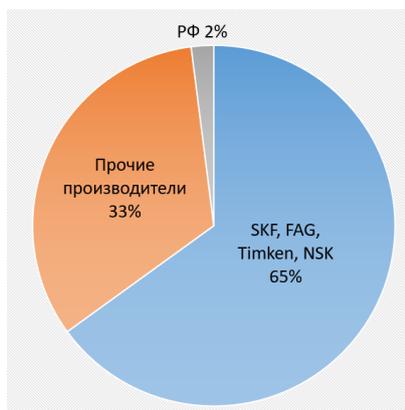


Рис. 1. Распределение производителей подшипников на мировом рынке

Описание эксперимента. Для проведения исследования использовался набор данных «Vibration analysis metrics of a ball bearing during different operational states», находящийся в свободном доступе на сайте Google datasetsearch. Маркированный набор данных предоставляет собой файл формата CSV и содержит показатели работы подшипника качества 6204. К ним относят характеристики вибрации: виброскорость (v -RMS), виброускорение (a -RMS), ударное виброускорение (a -Peak).

Целевая переменная – bearing state, характеризует работу подшипника в следующих режимах:

- 1) шарикоподшипник с уплотнением с рекомендуемым количеством смазки;
- 2) шарикоподшипник без уплотнения без смазки;
- 3) шарикоподшипник без уплотнения с избыточным количеством смазки.

В процессе исследования датасета был выполнен статистический анализ признаков для каждого значения целевого класса. Выявлены и удалены из обучающей выборки признаки с значительными отклонениями от среднестатистических показателей – выбросы (рис. 2).

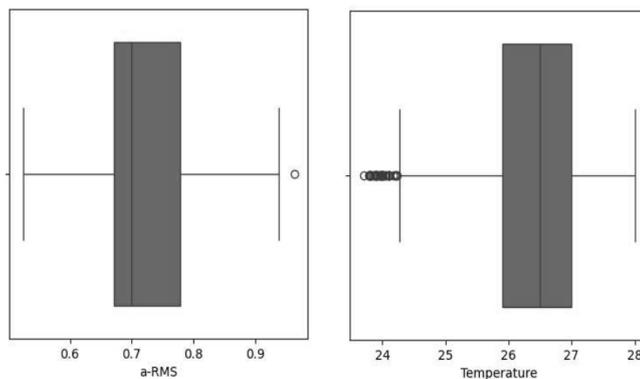


Рис. 2. Диаграммы рассеяния Voxplot

Показатели температуры были нормализованы для приведения ее к одной размерности с остальными признаками датасета с помощью библиотеки StandardScaler.

Отнесение целевой переменной к одному из заранее определенных классов – это задача классификации, поэтому для ее решения были использованы следующие базовые алгоритмы [7, 8], зарекомендовавшие себя в решении аналогичных задач: KNN, RandomForestClassifier, SVM [9, 10].

Метод К-ближайших соседей (K-Nearest Neighbors) основан на поиске кратчайшей дистанции между тестируемым объектом и ближайшими к нему классифицированными объектами из обучающего набора данных [11] (1):

$$a(u) = \operatorname{argmax}_{y \in Y} \sum_{i=1}^m [y(x_{i,u}) = y] * w(i, u), \quad (1)$$

где u – объект классификации, y – целевой класс, $w(i, u)$ – весовая функция оценивающая степень важности i -го соседа.

$$w(i, u) = [i \leq k], \quad (2)$$

где k – целочисленное значение, характеризующее количество соседей (2).

В методе KNN выбор значения k очень важен. При маленьком значении k "шум" будет оказывать сильное воздействие на итоговый результат. Большое значение делает его затратным с точки зрения вычислений и противоречит основной идее KNN, что близкие точки могут иметь схожие плотности или классы [12]. Значение по умолчанию для количества k -соседей - 5 ближайших соседей. Графическим способом, с оценкой количества ошибок на каждой итерации, определено значение k -соседей = 4, при котором достигается максимальная точность модели.

В качестве метрики модели использовано расстояние Минковского [13] (3):

$$p(x, y) = (\sum_{i=2}^n |x_i - y_i|^p)^{\frac{1}{p}}, \quad (3)$$

где x, y – точки пространства, параметр p принят равным 2.

Классифицируемый объект будет относиться к тому классу, к которому принадлежит ближайший объект набора. Определение наиболее важных признаков, с точки зрения их влияния на предсказательную способность модели, производилось с помощью дисперсионного анализа по методу Anova – статистического метода, основанного на сравнении средних значений выборок данных между собой [14, 15]. Точность классификации по методу KNN составила 98,6% и 98,1% на тренировочных и тестовых результатах соответственно.

RandomForestClassifier (RFC) – этот классификатор разбивает данные на подмножества на основе различных критериев, так что у каждого подмножества образуется своя сортирующая категория. С каждым разделением количество объектов определённого критерия уменьшается [16]. Классификация подойдёт к концу, когда сеть дойдёт до подмножества только с одним объектом (4):

$$a(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_i(X), \quad (4)$$

где $a(x)$ – классификатор, N – количество деревьев, i – счетчик деревьев, b – решающее дерево, x – выборка данных.

Критичным параметром для деревьев решений, влияющим на точность модели, является глубина обучения – `max_depth`. В рамках исследования параметр `max_depth` принят равным 15. Определение параметра производилось с помощью инструмента `GridSearch()` библиотеки `scikit-learn`. Анализ значимости признаков производился с помощью встроенного метода `feature_importances`.

Точность классификации по методу RFC составила 100% и 98,2% на тренировочных и тестовых значениях соответственно

SVM – принцип работы алгоритма построен на предположении, что чем больше расстояние (зазор) между разделяющей гиперплоскостью и объектами разделяемых классов, тем меньше будет средняя ошибка классификатора (5) [17]:

$$a(\vec{x}) = \operatorname{sign}(\sum_{i=1}^c w_i X_i - b), \quad (5)$$

где \vec{x} – вектор значений признаков объекта, w_i, b – параметры гиперплоскости, c – константа.

С целью инициализации значимых признаков использован алгоритм Recursive feature elimination (RFE) – рекурсивный поиск и удаление признаков по значимости [18, 19].

Точность классификации по методу SVM составила 97,1% и 97,3% на тренировочных и тестовых значениях соответственно

Результаты. Все три модели показали удовлетворительный результат обучения и могут быть применены в качестве практической модели классификации подшипников по состоянию их смазки:

1. Модель RandomForestClassifier показала наиболее высокие результаты классификации как на тестовых, так и на тренировочных данных. На тестовых данных ее ошибка не превышает 2%;

2. Наиболее значимым признаком для предсказания целевой переменной "Bearing State" у всех трех моделей оказался признак V-rms – показатель виброскорости (м/с).

Результаты оценки важности признаков можно использовать для выбора наиболее подходящих для решения задачи классификации приборов диагностики, при оснащении ими промышленного оборудования, с целью дальнейшего применения алгоритмов классификации.

Заключение. В промышленности все большее значение уделяется вопросам автономной диагностики технического состояния оборудования [20]. На основе результатов показаний датчиков, установленных на оборудовании для контроля вибрации и температуры подшипниковых узлов, прогнозируются отказы оборудования и сроки ремонтов.

Предлагаемая модель позволяет расширить возможности использования диагностических данных, для решения задач оптимизации сервисного обслуживания, что позволит продлить сроки службы оборудования, путем корректировки объемов ремонта, в части повышения качества операции по смазке оборудования, производя ее в достаточном количестве и в требуемое время. Что, в конечном счете позволит сократить затраты на обслуживание оборудования с благодаря росту срока службы деталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонов В.С., Верзин В.А. Борьба с простоями как способ повышения экономической эффективности бизнеса // Экономика и жизнь. – 2021. – № 33. – URL: <https://www.economicsonline.ru/article/440363> (дата обращения: 16.04.2024).
2. Шеф С.П., Сакало В.И. Влияние смазочного материала на процессы, протекающие в подшипниках качения // Транспортное машиностроение. – 2016. – № 2. – С. 31-35.
3. Zhang X., Glovnea R., Morales-Espejel G.E., Félix-Quiñonez A. The Effect of Working Parameters upon Elastohydrodynamic Film Thickness Under Periodic Load Variation // Tribology Letters. – 2020. – Vol. 68, No. 2. – P. 1-10.
4. Zhang Sh., Jacobs G., Vafaei S. [et al.]. CFD investigation of starvation behaviors in a grease lubricated EHL rolling contact // Forschung im Ingenieurwesen. – 2023. – Vol. 87, No. 1. – P. 353-362.
5. Wandel S., Bader N., Glodowski Ja. [et al.]. Starvation and Re-lubrication in Oscillating Bearings: Influence of Grease Parameters // Tribology Letters. – 2022. – Vol. 70, No. 4. – P. 1-14.
6. Дрыночкин А.В., Аленина Е.Э., Тришкин А.Г. Анализ состояния российских предприятий подшипниковой подотрасли и смежных отраслей промышленности // Известия МГТУ «МАМИ». – 2012. – № 2 (14). – С. 8-13.
7. Бабаев А.М., Шемякина М.А., Ляшов М.В. Обзор классических методов машинного обучения в контексте решения задач классификации // Форум молодых ученых. – 2018. – № 11 (27). – С. 137-142.
8. Kumar Gupta K. Muzakkir S.M. A Model for Prediction of Outer Race Defects of Rolling Contact Bearing based on Vibration Data Using Machine Learning Algorithms // Tribology in Industry. – 2023. – Vol. 45, No. 4. – P. 676-685.
9. Kamiel B.P., Anjarico F., Sudarisman S. Deteksi cacat bantalan gelinding berbasis Algoritma decision trees Dan parameter Statistik // Jurnal Rekayasa Mesin. – 2023. – Vol. 14, No. 3. – P. 835-844.
10. Vishwendra M.A., Salunkhe P.S., Patil Sh.V. [et al.]. A Novel Method to Classify Rolling Element Bearing Faults Using K-Nearest Neighbor Machine Learning Algorithm // ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering. – 2022. – Vol. 8, No. 3.
11. Ульянов Н.В., Ахмедова Ш.А. Введение в анализ данных // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2022. – № 2. – С. 357-359.
12. Yeray Mezquita, Ricardo S. Alonso, Roberto Casado-Vara, Javier Prieto & Juan Manuel Corchado. A Review of k-NN Algorithm Based on Classical and Quantum Machine Learning // Distributed Computing and Artificial Intelligence, Special Sessions, 17th International Conference. – 2020. – P. 189-198.

13. Стрюков Р.К., Шашкин А.И. О модернизации метода ближайших соседей // Вестник ВГУ, серия: системный анализ и информационные технологии. – 2015. – № 1. – С. 114-120.
14. Аннаева М., Атанасосова А. Однофакторный дисперсионный анализ: методы и применение в статистике // Всемирный ученый. – 2023. – № 9 (1). – С. 267-271.
15. Le Minh Nhut, Le Ha Dong Quan. Study on Chiller Fault Detection and Diagnosis Method Based on KNN Algorithm and ANOVA // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2023. – P. 223-230.
16. Борисов П.Д., Косолапов Ю.В. Способ оценки схожести программ методами машинного обучения // Тр. Института системного программирования РАН. – 2022. – № 5 (34). – С. 63-75.
17. Cuentas S., Peñabaena-Niebles R., Garcia E. Support vector machine in statistical process monitoring: a methodological and analytical review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 91, No. 1. – P. 485-500.
18. Nemat Saberi A., Belahcen A., Sobra Ja., Vaimann T. LightGBM-Based Fault Diagnosis of Rotating Machinery Under Changing Working Conditions Using Modified Recursive Feature Elimination // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 81910-81925.
19. Escanilla N.S., Hellerstein L., Kleiman R., Kuang Z., Shull J.D., Page D. Recursive Feature Elimination by Sensitivity Testing // 17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications. – 2018. – P. 40-47.
20. Пырко С.А., Митюгло А.М., Ииметьев Е.Н. Автономные измерительные модули для систем диагностики электродвигателей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2020. – Т. 18, № 1. – С. 80-89.

REFERENCES

1. Antonov V.S., Verzin V.A. Bor'ba s prostoyami kak sposob povysheniya ekonomicheskoy effektivnosti biznesa [Combating downtime as a way to increase the economic efficiency of business], *Ekonomika i zhizn'* [Economics and Life], 2021, No. 33. Available at: <https://www.eg-online.ru/article/440363> (data obrashcheniya: 16.04.2024).
2. Shets S.P., Sakalo V.I. Vliyanie smazochnogo materiala na protsessy, protekayushchie v podshpinnikakh kacheniya [The influence of lubricant on the processes occurring in rolling bearings], *Transportnoe mashinostroyeniye* [Transport engineering], 2016, No. 2, pp. 31-35.
3. Zhang X., Glovnea R., Morales-Espejel G.E., Félix-Quiñonez A. The Effect of Working Parameters upon Elastohydrodynamic Film Thickness Under Periodic Load Variation, *Tribology Letters*, 2020, Vol. 68, No. 2, pp. 1-10.
4. Zhang Sh., Jacobs G., Vafaei S. [et al.]. CFD investigation of starvation behaviors in a grease lubricated EHL rolling contact, *Forschung im Ingenieurwesen*, 2023, Vol. 87, No. 1, pp. 353-362.
5. Wandel S., Bader N., Glodowski Ja. [et al.]. Starvation and Re-lubrication in Oscillating Bearings: Influence of Grease Parameters, *Tribology Letters*, 2022, Vol. 70, No. 4, pp. 1-14.
6. Drynochkin A.V., Alenina E.E., Trshkin A.G. Analiz sostoyaniya rossiyskikh predpriyatiy podshpinnikovoy podotrasli i smezhnykh otrasley promyshlennosti [Analysis of the state of Russian enterprises in the bearing sub-industry and related industries], *Izvestiya MGTU «MAMI»* [News of MSTU "MAMI"], 2012, No. 2 (14), pp. 8-13.
7. Babaev A.M., Shemyakina M.A., Lyashov M.V. Obzor klassicheskikh metodov mashinnogo obucheniya v kontekste resheniya zadach klassifikatsii [Review of classical machine learning methods in the context of solving classification problems], *Forum molodykh uchenykh* [Forum of Young Scientists], 2018, No. 11 (27), pp. 137-142.
8. Kumar Gupta K. Muzakkir S.M. A Model for Prediction of Outer Race Defects of Rolling Contact Bearing based on Vibration Data Using Machine Learning Algorithms, *Tribology in Industry*, 2023, Vol. 45, No. 4, pp. 676-685.
9. Kamiel B.P., Anjarico F., Sudarisman S. Deteksi cacat bantalan gelinding berbasis Algoritma decision trees Dan parameter Statistik, *Jurnal Rekayasa Mesin*, 2023, Vol. 14, No. 3, pp. 835-844.
10. Vishwendra M. A., Salunkhe P.S., Patil Sh.V. [et al.]. A Novel Method to Classify Rolling Element Bearing Faults Using K-Nearest Neighbor Machine Learning Algorithm, *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*, 2022, Vol. 8, No. 3.
11. Ulyanov N.V., Akhmedova Sh.A. Vvedenie v analiz dannykh [Introduction to data analysis], *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Current problems of aviation and astronautics], 2022, No. 2, pp. 357-359.
12. Yeray Mezquita, Ricardo S. Alonso, Roberto Casado-Vara, Javier Prieto & Juan Manuel Corchado. A Review of k-NN Algorithm Based on Classical and Quantum Machine Learning, *Distributed Computing and Artificial Intelligence, Special Sessions, 17th International Conference*, 2020, pp. 189-198.

13. Stryukov R.K., Shashkin A.I. O modernizatsii metoda blizhayshikh sosedey [On the modernization of the nearest neighbors method], *Vestnik VGU, seriya: sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii* [Vestnik VSU, series: system analysis and information technologies], 2015, No. 1, pp. 114-120.
14. Annaeva M., Atanapesova A. Odnofaktornyy dispersionnyy analiz: metody i primeneniye v statistike [One-factor analysis of variance: methods and application in statistics], *Vsemirnyy uchenyy* [World Scientist], 2023, No. 9 (1), pp. 267-271.
15. Le Minh Nhut, Le Ha Dong Quan. Study on Chiller Fault Detection and Diagnosis Method Based on KNN Algorithm and ANOVA, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2023, pp. 223-230.
16. Borisov P.D., Kosolapov Yu.V. Sposob otsenki pokhozhesti programm metodami mashinnogo obucheniya [A method for assessing the similarity of programs using machine learning methods], *Tr. Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Sciences], 2022, № 5 (34), pp. 63-75.
17. Cuentas S., Peñabaena-Niebles R., Garcia E. Support vector machine in statistical process monitoring: a methodological and analytical review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, Vol. 91, No. 1, pp. 485-500.
18. Nemat Saberi A., Belahcen A., Sobra Ja., Vaimann T. LightGBM-Based Fault Diagnosis of Rotating Machinery Under Changing Working Conditions Using Modified Recursive Feature Elimination, *IEEE Access*, 2022, Vol. 10, pp. 81910-81925.
19. Escanilla N.S., Hellerstein L., Kleiman R., Kuang Z., Shull JD, Page D. Recursive Feature Elimination by Sensitivity Testing, *17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications*, 2018, pp. 40-47.
20. Pyrko S.A., Mitioglo A.M., Ishmet'ev E.N. Avtonomnye izmeritel'nye moduli dlya sistem diagnostiki elektrodvigateley [Autonomous measuring modules for electric motor diagnostic systems], *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after. G.I. Nosova], 2020, Vol. 18, No. 1, pp. 80-89.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.А. Кравченко.

Креницин Павел Геннадьевич – ООО «ИСО» филиал в г. Братск; e-mail: alfa_reklama@mail.ru; г. Братск, Россия; тел.: +79501228427; аспирант; менеджер по надежности.

Ченцов Сергей Васильевич – Сибирский федеральный университет; e-mail: schentsov@sfu-kras.ru; г. Красноярск, Россия; тел.: +73912912235; кафедра систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования; д.т.н.; профессор.

Krinitzin Pavel Gennadievich – LLC "ISO" branch in Bratsk; e-mail: alfa_reklama@mail.ru; Bratsk, Russia; phone: +79501228427; postgraduate student; reliability manager.

Chentsov Sergey Vasilievich – Siberian Federal University; e-mail: schentsov@sfu-kras.ru; Krasnoyarsk, Russia; phone: +73912912235; the Department of Systems Automation, Automated Control and Design; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-98-107

В.В. Курейчик, А.Ю. Халенков

КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОИСК ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДВУМЕРНОЙ УПАКОВКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФИГУР СЛОЖНЫХ ФОРМ

Рассмотрена задача двумерной упаковки геометрических фигур сложных форм. Задачи данного класса отнесены к классу NP-трудных проблем комбинаторной оптимизации. Помимо этого, упаковка фигур сложных геометрических форм, является одним из наиболее сложных подтипов задачи двумерной упаковки. В связи с этим необходима разработка эффективных эвристических подходов к решению данной задачи. В статье дана постановка задачи, описаны ее основные особенности, приведены ограничения и условия характерные для данного подтипа задачи двумерной упаковки. Описан критерий для подсчета эффективности решения. Для решения данной задачи в статье предлагается архитектура комбинированного поиска, состоящая из двух метаэвристических вычислительных алгоритмов. В данной архитектуре в качестве оптимизационных методов были реализованы модифицированный генетический и роевой мультиагентный биоинспирирован-

ный алгоритм, основанный на поведении пчелиной колонии. Данные алгоритмы позволяют получать наборы квазиоптимальных решений за полиномиальное время. Приведены преимущества от использования предлагаемого подхода. Для проверки эффективности предложенного подхода был разработан программный продукт, который использует предложенную архитектуру и метаэвристические вычислительные алгоритмы при решении поставленной задачи. Разработка программного продукта велась на языке программирования C++ и написана в среде разработки Microsoft Visual Studio Code. Проведен вычислительный эксперимент на наборе тестовых примеров-бенчмарков. По результатам экспериментальных исследований сделан вывод об эффективности предложенного комбинированного поиска при решении задачи двумерной упаковки геометрических фигур сложных форм в сравнении с решениями, базирующимися на классических алгоритмах.

Двумерная упаковка; комбинированный поиск; размещение; генетический алгоритм; биоинспирированная логика; алгоритм пчелиной колонии; оптимизация.

V.V. Kureichik, A.J. Khalenkov

COMBINED SEARCH FOR SOLVING THE PROBLEM OF TWO-DIMENSIONAL PACKING OF GEOMETRIC FIGURES OF COMPLEX FORMS

The article considers the problem of two-dimensional packing of geometric shapes of complex shapes. The problems of this class are classified as NP-hard problems of combinatorial optimization. In addition, the packaging of shapes of complex geometric shapes is one of the most difficult subtypes of the two-dimensional packaging problem. In this regard, it is necessary to develop effective heuristic approaches to solving this problem. The article presents the formulation of the problem, describes its main features, and presents the limitations and conditions characteristic of this subtype of the two-dimensional packaging problem. The criterion for calculating the effectiveness of the solution is described. To solve this problem, the article proposes a combined search architecture consisting of two metaheuristic computational algorithms. In this architecture, a modified genetic and swarm multi-agent bioinspired algorithm based on the behavior of a bee colony was implemented as optimization methods. These algorithms allow us to obtain sets of quasi-optimal solutions in polynomial time. The advantages of using the proposed approach are given. To test the effectiveness of the proposed approach, a software product was developed that uses the proposed architecture and metaheuristic computational algorithms to solve the problem. The software product was developed in the C++ programming language and written in the Microsoft Visual Studio Code development environment. A computational experiment was conducted on a set of benchmark test cases. Based on the results of experimental studies, it is concluded that the proposed combined search is effective in solving the problem of two-dimensional packing of geometric shapes of complex shapes in comparison with solutions based on classical algorithms.

Two-dimensional packing; generalized approach; packing of geometric shapes of complex shapes; placement; genetic algorithm; bioinspired logic; Bee Colony algorithm; optimization.

Введение. В настоящее время этап проектирования систем имеет наибольшую важность. Системы автоматизированного проектирования решают широкий спектр задач от рассмотрения технического задания до написания полной документации используя как технические средства, так и средства математического обеспечения [1]. Такие системы находят широкое применение в промышленности, например при решении задач комбинаторной оптимизации, связанных с оптимальным распределением различных ресурсов. К таким задачам относятся задачи упаковки и рассматриваемая задача двумерной упаковки, в частности. Задачи упаковки отнесены к классу NP-трудных задач, это означает, что для них не представляется возможным найти конкретное решение [2]. Решением в таких задачах является максимальное приближенное значение или набор значений. В данной статье внимание уделяется одному из самых сложных подвидов задачи, а именно задаче двумерной упаковки геометрических фигур сложных форм. Рассматриваемый подвид задачи в разной реализации имеет значительную актуальность в промышленности, где при раскрое листовых материалов весьма важным является оптимальная компоновка разнородных объектов на листе. Размещаемые фигуры могут иметь сложную форму, что снижает эффективность существующих методов оптимизации. Для эффективного решения подобных задач в последнее время активно применяются решения, основанные на различных эвристических алгоритмах. Например, основанных на биоинспирированной логике [3–8].

Описание и постановка задачи. Задача двумерной упаковки представляет из себя задачу по упаковке двумерных объектов в двумерный контейнер, который может быть как ограниченный, так и неограниченный. Как например упаковка прямоугольников в квадрат или упаковка в полуограниченную полосу [9–13]. Задача двумерной упаковки фигур сложных геометрических форм является наиболее сложным подвидом задачи двумерной. Фигуры сложных геометрических форм заведомо имеют большее количество вариантов расположения друг с другом, нежели простые. Увеличение числа вариантов, сказывается на скорости и качестве решений. Однако данная задача имеет высокую практическую значимость, поскольку производствам, связанным с раскроем листовых материалов, часто приходится иметь дело с заготовками сложных форм. Такие заготовки неудобно располагать на карте раскроя, образуется много отходов при неоптимальном размещении.

Формально опишем основные условия задачи двумерной упаковки геометрических фигур сложных форм. задается двумерный контейнер, в который будут вписываться фигуры. Контейнер имеет ширину и длину. Пусть $M = \{m_x, m_y\}$, где m_x и m_y определены как длина и ширина. задается набор разнородных двумерных фигур, у которых более 4 углов. $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$. Каждая фигура представлена в виде набора вершин, соединенных между собой, как показано на рис. 1.



Рис. 1. Набор фигур сложных геометрических форм

Фигуры: A_i внутри контейнера определяется по: $x_{\min i}$, $y_{\min i}$, t_i , где $x_{\min i}$ – проекция самой левой точки фигуры относительно контейнера; $y_{\min i}$ – проекция самой нижней точки; t_i – параметр угла поворота фигуры в контейнере на плоскости. Фигуры требуется поместить внутри контейнера, в таком порядке, чтобы высота занятой ими площади в виде прямоугольной области была как можно меньше [9]. Пример расположения фигур внутри контейнера показан на рис. 2.

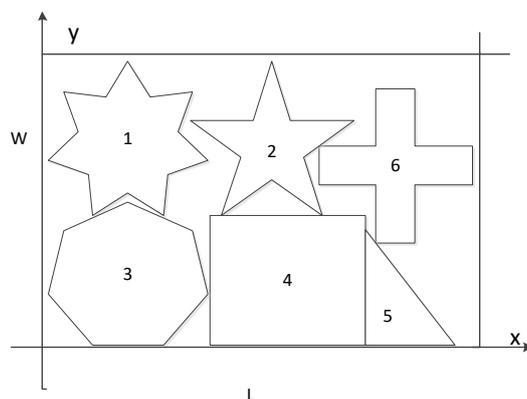


Рис. 2. Пример расположения элементов

Размещение является корректным если оно соответствует следующим ограничениям:

- ♦ Суммарная площадь всех фигур меньше площади самого контейнера:

$$\sum_{i=1}^n S_i \leq S_{\text{общ}}, \quad (1)$$

где S_i – площадь i -ой фигуры в контейнере, $S_{\text{общ}}$ – площадь контейнера;

- ◆ Фигуры не пересекаются между собой:

$$f_{ij}(x_i, y_i, t_i, x_j, y_j, t_j, \dots, x_n, y_n, \varphi_n) \geq 0 \quad i \neq j; \quad i, j=1, 2, \dots, n; \quad (2)$$

- ◆ Фигуры не выходят за пределы контейнера:

$$\begin{cases} x_{\min i} \geq 0; \\ y_{\min i} \geq 0; \\ x_{\max i} \leq m_x; \\ y_{\max i} \leq m_y. \end{cases} \quad (3)$$

ЦФ определяется как оставшееся незанятое пространство внутри контейнера. Чтобы конкретизировать достижение ЦФ введем коэффициент раскроя К, который будет рассчитываться согласно следующей формуле:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S_{\text{общ}}}, \quad (4)$$

где S_i – площадь i -того объекта расположенного на поверхности поля (суммарная площадь занятой части), $S_{\text{общ}}$ – общая площадь поля. После размещения всех фигур контейнер будет содержать незанятую ими область. Для подсчета эффективности результатов решения задачи этого следует выделить деловой отход рис. 3.

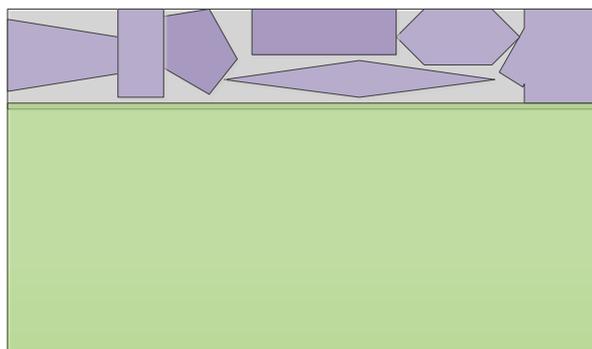


Рис. 3. Выделение делового отхода

Деловой отход – остаточное незанятое пространство контейнера, который используется при подсчёте КИМ (коэффициент использованного материала), он будет вычтен из $S_{\text{общ}}$. Деловым отходом является наибольшая прямоугольная площадь свободного листа [9, 10, 13]. Для того чтобы оценить качество полученного в результате решения задачи расчётного коэффициента, необходимо знать его теоретически максимальное значение, поскольку во многих случаях достижение КИМ = 0 невозможно. Зная это значение, и сравнив его с полученным, при решении задачи, можно сделать вывод о качестве полученного раскроя. Если коэффициент при одном решении равен 0.5, а при другом 0.4, то, последний будет являться более эффективным расположением фигур, поскольку занятое при таком расположении место в контейнере минимально.

Архитектура комбинированного поиска используется для решения задач конструкторского проектирования, при ее использовании применяется распараллеливание процесса поиска, с целью уменьшения размерности задачи [14]. Использование комбинированной логики позволяет сокращать временные затраты и получать оптимальные и квазиоптимальные результаты за полиномиальное время. Предлагается архитектура комбинированного поиска рис. 4, включающая в себя модифицированный генетический алгоритм (МГА) [3, 4, 15–17] и модифицированный алгоритм пчелиной колонии (МАПК) [18–21].

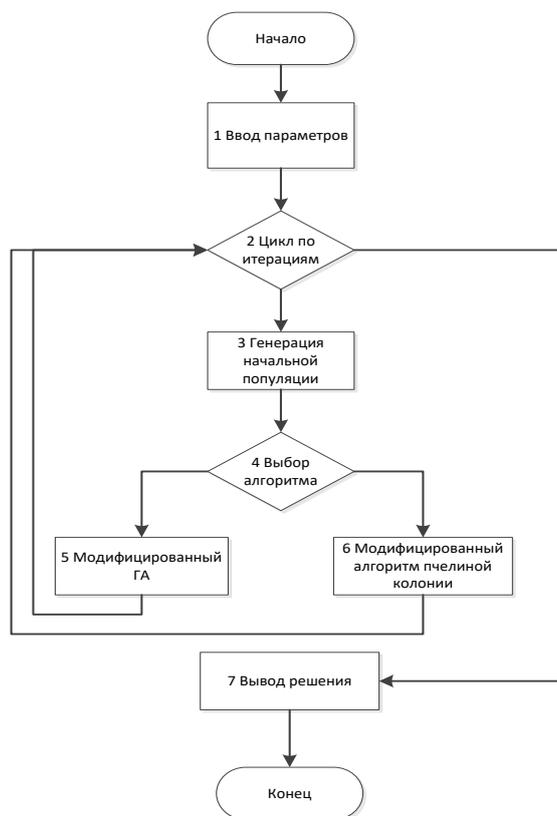


Рис. 4. Укрупненная схема архитектуры поиска

МГА быстрее работает с большой размерностью данных, позволяя оперативно отсеять заведомо неоптимальные решения. Алгоритм пчелиной колонии содержит достаточно развитую ролевую реализацию и ориентирован на улучшение качества решений, но хуже справляется с большой размерностью. Таким образом архитектура продолжает работу до тех пор, пока не будет достигнут критерий останова или исчерпан лимит числа итераций.

Рассмотрим работу архитектуры поиска поэтапно. В первом блоке задается размер популяции и число итераций цикла. Во втором блоке инициализируется цикл по алгоритмам либо МГА, либо МАПК (модифицированный алгоритм пчелиной колонии). Далее в третьем блоке происходит генерация стартовой популяции, после чего в четвертом блоке определяется алгоритм, который будет использоваться на текущей итерации цикла. Выбор алгоритма в ходе работы на каждой итерации происходит на основании размерности алгоритма, если по ЦФ МГА становится слабо эффективен и блок анализа перспективных решений регистрирует, что прирост по ЦФ упал ниже 5%, то выбирается МАПК. После выхода из цикла производится вывод наилучшего решения.

Предлагаемая архитектура поиска имеет следующие преимущества:

- ◆ Позволяет находить наиболее оптимальные решения за приемлемое время.
- ◆ Использует модифицированный генетический алгоритм, эффективность которого выше с учетом большой сложности рассматриваемой задачи, при умеренных временных затратах.
- ◆ Использован продвинутый роевой алгоритм, обеспечивающий высокое качество решений.
- ◆ Работа поиска происходит не с одним решением, а с множеством альтернативных решений.

Модифицированный генетический алгоритм – это алгоритм, основанный на механизмах натуральной селекции и генетики, направленный на поиск квазиоптимальных решений с помощью наследования и усиления полезных свойств [3, 4, 16]. Генетические алгоритмы являются случайно – направленными методами перебора множества решений, которые используются для решения NP-полных задач. Для улучшения работы генетического алгоритма, предлагается, дополнить базовую архитектуру блоками «Эволюционной адаптации» и «Анализа перспективности решений». Будут использованы следующие механизмы отбора: наследование «Благоприобретенных признаков» и «Выживание сильнейших». Как итог получаем архитектуру модифицированного генетического алгоритма (МГА) рис. 5.



Рис. 5. Архитектура модифицированного ГА

Модифицированный алгоритм пчелиной колонии. Представляет собой метаэвристический мультиагентный алгоритм, реализующий роевую модель поведения пчел [4–8, 18–21]. Агенты определяются следующими ролями: пчелы-фуражиры (рабочие) и пчелы-разведчики. Основная механика работы заключается в том, что пчела-разведчик, найдя участок с нектаром с помощью танца сообщает об этом улью, после чего пчелы-фуражиры летят к участку. Рассмотрим работу алгоритма пчелиной колонии поэтапно. Сначала вводятся стартовые параметры: количество рабочих пчел, число пчел-разведчиков на элитных участках, общее число участков, число элитных участков, размер участков и время работы. Далее происходит генерация участков для последующего поиска. Производится оценка решений, расчет целевой функции (ЦФ). Количество нектара на источнике обратно пропорционально ЦФ. Затем определяются лучшие участки, и фуражиры отправляются для их исследования. На следующем шаге свободные пчелы разведчики осуществляют случайный поиск участков, на которых производится локальный поиск. Для улучшения работы базовая структура алгоритма дополняется блоком «Анализа тенденции качества получаемых решений», который следит за тем, насколько сильно в сравнении с прошлыми итерациями получен прирост в ЦФ. После чего идет расчет полезности участка, по количеству нектара. В конце по достижению критерия останова алгоритм завершает работу и выводит наилучшее решение. На рис. 6 представлена схема реализации алгоритма роя пчел.

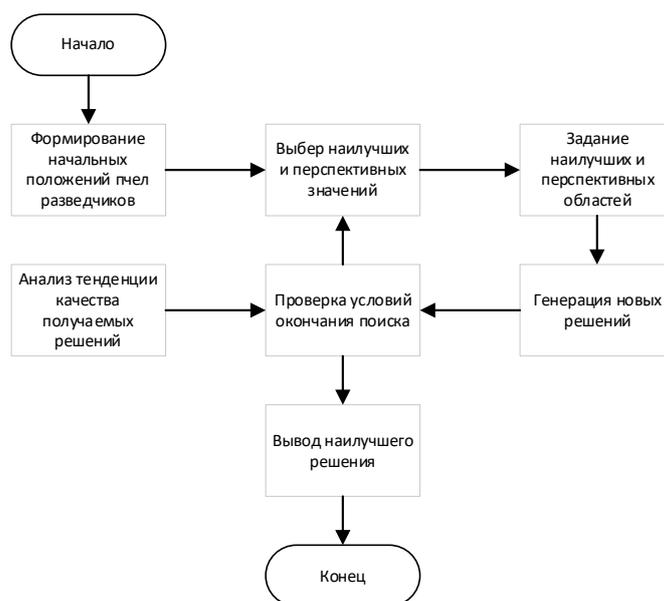


Рис. 6. Схема алгоритма модифицированного алгоритма пчелиной колонии

Вычислительный эксперимент. Для подтверждения эффективности разработанного решения был разработан программный продукт, имплементирующий предложенную архитектуру. Продукт разработан на языке программирования C++, использовалась среда разработки Microsoft Visual Studio Code. При помощи данного программного продукта проведен вычислительный эксперимент на наборе бенчмарков [22] зависимости ЦФ от размерности задачи. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 1 и на рис. 7.

Таблица 1

Сравнение гибридного алгоритма с ГА и АСВ

Количество блоков	ГА	АПК	Предлагаемый подход
50	0,55	0,72	0,72
250	0,53	0,64	0,68
500	0,51	0,6	0,66
750	0,49	0,5	0,6
1000	0,46	0,43	0,57
Среднее значение	0,51	0,58	0,64

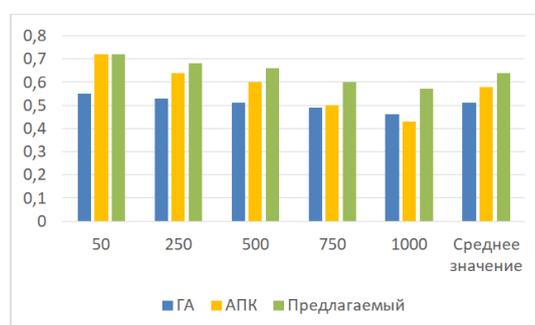


Рис. 7. Гистограмма сравнения эффективности разработанного подхода

Заключение. В данной статье рассмотрена задача двумерной упаковки геометрических фигур сложных форм. Дана постановка задачи. Описаны характерные особенности рассматриваемого подтипа задачи. Предложена архитектура комбинированного подхода к решению данной задачи. Приведена схема работы архитектуры, дано ее пояснение. Разработан модифицированный генетический алгоритм, в котором использован блок анализа перспективности решений. А также использован алгоритм пчелиной колонии. Для измерения эффективности был написан программный продукт, в котором для поиска решения задачи используется предложенная архитектура поиска. Для его разработки использовался язык программирования C++, программа написана в среде разработки Microsoft Visual Studio Code. С помощью данного ПО был проведен вычислительный эксперимент. По результатам эксперимента сделан вывод о том, что предложенная архитектура справляется вне зависимости от размерности на 6.6% лучше нежели обычный алгоритм пчелиной колонии и на 13% лучше обычного генетического алгоритма. Вычислительный эксперимент позволяет сделать вывод об эффективности использования данного подхода для решения задачи двумерной упаковки геометрических фигур сложной форм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Норенков И.П.* Основы автоматизированного проектирования: учебник. – М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2006. – 336 с.
2. *Кормен, Т. Лейзерсон И., Ривест Р.* Алгоритмы. Построение и анализ. – М.: МЦМО, 2000.
3. *Kureichik V.V., Kureichik V.M.* Genetic Search-Based Control // Automation and Remote Control. – 2001. – Vol. 62, 10. – P. 1698-1710.
4. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
5. *Родзин С.И., Курейчик В.В.* Теоретические вопросы и современные проблемы развития когнитивных биоинспирированных алгоритмов оптимизации (обзор) // Кибернетика и программирование. – 2017. – № 3. – С. 51-79.
6. *Abraham A., Ramos V., Grosan G.* Swarm Intelligence in Data Mining. – Berlin. Heidelberg: Springer Verlag, 2007. – 267 p.
7. *Hassanien E. Emary E.* Swarm Intelligence: Principles Advances, and Applications. – CRC Press, 2015. – 228 p.
8. *Mourelle M., Nedjah L.* De Swarm intelligent systems. – Berlin: Heidelberg: Springer Verlag, 2006. – 217 p.
9. *Мухачева Э.А., Верхотуров М.А., Мартынов В.В.* Модели и методы расчета раскроя – упаковки геометрических объектов. – Уфа: УГАТУ, 1998. – 216 с.
10. *Левин М.Ш.* Упаковка в контейнеры (перспективные модели, примеры) // Информационные процессы. – 2017. – № 1. – С. 43-60.
11. *Кулиев Э.В., Герасименко Е.М., Халенков А.Ю., Семенова М.М., Игнатьева С.В.* Разработка биоинспирированного алгоритма решения задачи двумерной упаковки // Информатизация и связь. – 2021. – № 3. – С. 78-85.
12. *Ванидовский В.А., Лебедев О.Б., Пантелюк Е.А., Кулиева Н.В.* Двумерная упаковка в полуограниченную полосу на основе моделирования адаптивного поведения муравьиной колонии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 9. – С. 21-27.
13. *Орлов А.Н., Курейчик В.В., Глуценко А.Е.* Комбинированный генетический алгоритм решения задачи раскроя // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 6 (179). – С. 5-13.
14. *Курейчик В.В., Бова В.В., Курейчик В.В.* Комбинированный поиск при проектировании // Образовательные ресурсы и технологии. – 2014. – № 2 (5). – С. 90-94.
15. *Lawrence Davis.* Handbook of Genetic Algorithms / Ed. by Lawrence Davis. – USA: Van Nostrand Reinhold, New York, 1991. – 100 p.
16. *Holland John H.* Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Application to Biology, Control, and Artificial Intelligence. – USA: University of Michigan, 1975. – 183 p.
17. *Goldberg David E.* Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning. – USA: Addison-Wesley Publishing Company. Ind., 1989. – 196 p.
18. *Karaboga D.* An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. – Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005. – 110 p.

19. *Xiuqin P, Yun W, Yong L, Na S.* Improved artificial bee colony algorithm based on two-dimensional queue structure for complex optimization problems // *Alexandria Engineering Journal*. – 2024. – Vol. 86. – P. 669-679.
20. *Курейчик В.В., Полупанова Е.Е.* Эволюционная оптимизация на основе алгоритма колонии пчёл // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2009. – № 12 (101). – С. 41-46.
21. *Pham D.T., Castellani M.* The Bees Algorithm – Modelling Foraging Behaviour to Solve Continuous Optimization Problems // *Proc. ImechE, Part C*. – 2009. – 223 (12). – P. 2919-2938.
22. *Weiss M.A.* Data Structures and Algorithm Analysis in C++. – Boston: Pearson Education, 2014. – 656 p.

REFERENCES

1. *Norenkov I.P.* Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya: uchebnik [Fundamentals of computer-aided design: textbook]. Moscow: Izd-vo MGTU imeni N.E. Bauman, 2006, 336 p.
2. *Kormen, T. Leyzerson I., Rivest R.* Algoritmy. Postroenie i analiz [Algorithms. Construction and analysis]. Moscow: MTSMO, 2000.
3. *Kureichik V.V., Kureichik V.M.* Genetic Search-Based Control, *Automation and Remote Control*, 2001, Vol. 62, 10, pp. 1698-1710.
4. *Karpenko A.P.* Sovremennye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy: ucheb. posobie [Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature: textbook. Allowance]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2014.
5. *Rodzin S.I., Kureychik V.V.* Teoreticheskie voprosy i sovremennyye problemy razvitiya kognitivnykh bioinspirirovannykh algoritmov optimizatsii (obzor) [Theoretical issues and modern problems in the development of cognitive bioinspired optimization algorithms (review)], *Kibernetika i programmirovaniye* [Cybernetics and Programming], 2017, No. 3, pp. 51-79.
6. *Abraham A., Ramos V., Grosan G.* Swarm Intelligence in Data Mining. Berlin. Heidelberg: Springer Verlag, 2007, 267 p.
7. *Hassanien E. Emary E.* Swarm Intelligence: Principles Advances, and Applications. CRC Press, 2015, 228 p.
8. *Mourelle M., Nedjah L.* De Swarm intelligent systems. Berlin: Heidelberg: Springer Verlag, 2006, 217 p.
9. *Mukhacheva E.A., Verkhotourov M.A., Martynov V.V.* Modeli i metody rascheta raskroya – upakovki geometricheskikh ob'ektov [Models and methods for calculating cutting - packaging of geometric objects]. Ufa: UGATU, 1998, 216 p.
10. *Levin M.Sh.* Upakovka v konteynery (perspektivnye modeli, primery) [Packaging in containers (promising models, examples)], *Informatsionnye protsessy* [Information processes], 2017, No. 1, pp. 43-60.
11. *Kuliev E.V., Gerasimenko E.M., Khalenkov A.Yu., Semenova M.M., Ignat'eva S.V.* Razrabotka bioinspirirovannogo algoritma resheniya zadachi dvumernoy upakovki [Development of a bioinspired algorithm for solving the two-dimensional packaging problem], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and Communication], 2021, No. 3, pp. 78-85.
12. *Vanidovskiy V.A., Lebedev O.B., Pantelyuk E.A., Kulieva N.V.* Dvumernaya upakovka v poluogranichennuyu polosyu na osnove modelirovaniya adaptivnogo povedeniya murav'inoy kolonii [Two-dimensional packing in a semi-limited strip based on modeling the adaptive behavior of an ant colony], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9, pp. 21-27.
13. *Orlov A.N., Kureychik V.V., Glushchenko A.E.* Kombinirovannyi geneticheskiy algoritm resheniya zadachi raskroya [Combined genetic algorithm for solving the cutting problem], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 6 (179), pp. 5-13.
14. *Kureychik V.V., Bova V.V., Kureychik V.V.* Kombinirovannyi poisk pri proektirovanii [Combined search in design], *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii* [Educational resources and technologies], 2014, No. 2 (5), pp. 90-94.
15. *Lawrence Davis.* Handbook of Genetic Algorithms, Ed. by Lawrence Davis. USA: Van Nostrand Reinhold, New York, 1991, 100 p.
16. *Holland John H.* Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Application to Biology, Control, and Artificial Intelligence. USA: University of Michigan, 1975, 183 p.
17. *Goldberg David E.* Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning. USA: Addison-Wesley Publishing Company. Ind., 1989, 196 p.
18. *Karaboga D.* An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005, 110 p.
19. *Xiuqin P, Yun W, Yong L, Na S.* Improved artificial bee colony algorithm based on two-dimensional queue structure for complex optimization problems, *Alexandria Engineering Journal*, 2024, Vol. 86, pp. 669-679.

20. Kureychik V.V., Polupanova E.E. Evolyutsionnaya optimizatsiya na osnove algoritma kolonii pchel [Evolutionary optimization based on the bee colony algorithm], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 12 (101), pp. 41-46.
21. Pham D.T., Castellani M. The Bees Algorithm – Modelling Foraging Behaviour to Solve Continuous Optimization Problems, *Proc. ImechE, Part C*, 2009, 223 (12), pp. 2919-2938.
22. Weiss M.A. Data Structures and Algorithm Analysis in C++. Boston: Pearson Education, 2014, 656 p.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Л.С. Лисицына.

Курейчик Владимир Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: vkur@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; д.т.н.; профессор; зав. кафедрой.

Халенков Александр Юрьевич – e-mail: van-de-cristo@yandex.ru; тел.: +79289652190; кафедра САПР.

Kureichik Vladimir Victorovich – SouthernFederalUniversity; e-mail: vkur@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; the Department of Computer Aided Design; dr. of eng. sc.; professor; head of department.

Khalenkov Alexander Jurevich – e-mail: van-de-cristo@yandex.ru; phone: +79289652190; the Department of Computer Aided Design.

УДК 621.397.13

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-107-117

С.Н. Мелешкин, И.Б. Силес

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ С ПОВОРОТОМ СИГНАЛЬНОГО СОЗВЕЗДИЯ В СТАНДАРТЕ DTMB НА БАЗЕ SIMULINK МОДЕЛИ В СРЕДЕ MATLAB

Рассматриваются модифицированные алгоритмы с поворотом сигнального созвездия примененные в стандарте цифрового наземного телевизионного мультимедийного вещания принятом на Кубе. По сравнению с использованием созвездий без поворота, эти алгоритмы дают значительное увеличение производительности системы в сложных условиях приема, с индустриальными помехами и низким соотношением сигнала к шуму. В данной работе проведен анализ влияния угла и направления поворота сигнального созвездия на устойчивость системы цифрового наземного телевизионного мультимедийного вещания. Основной целью данной работы является анализ влияния угла и направления поворота сигнального созвездия на устойчивость системы цифрового наземного телевизионного мультимедийного вещания. Для исследования была разработана собственная архитектура системы цифрового наземного телевизионного мультимедийного вещания, принятая на Кубе, реализованная в Simulink в среде Matlab. Указанная Simulink модель позволяет проводить анализ зависимости коэффициента битовых ошибок от значения белого гауссовского шума для различных конфигураций системы. В исследованиях широко применяется модель аддитивного белого гауссовского шума, который подмешивается к сформированному сигналу. Предложенные модификации позволяют вести прием цифрового наземного телевизионного мультимедийного вещания в каналах без замираний при равных значениях коэффициента битовых ошибок для всех анализируемых случаев. При этом, для получения существенного выигрыша от поворота созвездия, порядка семи децибел, квадратурные и синфазные компоненты предлагается передавать на разных поднесущих и в разные моменты времени. В схеме с поворотом сигнального созвездия, квадратурную компоненту нужно передавать не на той же самой поднесущей, а с задержкой и на другой поднесущей. Тогда из одной квадратурной амплитудной модуляции получается фактически две амплитудные двоичные модуляции в синфазной и квадратурной проекции, которые передаются на независимых поднесущих, и поражаются помехами по-разному, что обеспечивает надежность демодуляции при более низких значения соотношения сигнала к шуму и воздействию индустриальных помех. Недостатком алгоритма является недостаточное противодействие зашумлению гауссовским шумом.

Цифровое наземное телевизионное мультимедийное вещание; Matlab; Simulink; сигнальные созвездия; аддитивный белый гауссовский шум; коэффициент битовых ошибок; модуляция; кодирование.

S.N. Meleshkin, I.B. Siles

STUDY OF MODIFIED ALGORITHMS WITH SIGNAL CONSTELLATION ROTATION IN DTMB STANDARD ON THE BASIS OF SIMULINK MODEL IN MATLAB ENVIRONMENT

This paper discusses modified algorithms with signal constellation rotation applied in the digital terrestrial television multimedia broadcasting standard adopted in Cuba. Compared to using constellations without rotation, these algorithms give a significant increase in system performance under challenging reception conditions, with industrial interference and low signal-to-noise ratio. This paper analyzes the effect of the angle and direction of rotation of the signal constellation on the stability of the digital terrestrial television multimedia broadcasting system. The main purpose of this paper is to analyze the effect of the angle and direction of rotation of the signal constellation on the stability of the digital terrestrial television multimedia broadcasting system. For the study, a proprietary architecture of digital terrestrial television multimedia broadcasting system adopted in Cuba was developed, implemented in Simulink in Matlab environment. This Simulink model allows analyzing the dependence of the bit error rate on the value of white Gaussian noise for different system configurations. The model of additive white Gaussian noise, which is mixed with the generated signal, is widely used in the research. The proposed modifications allow the reception of digital terrestrial television multimedia broadcasting in fade-free channels with equal values of the bit error rate for all cases analyzed. In this case, in order to obtain a significant gain from constellation rotation, in the order of seven decibels, it is proposed to transmit the quadrature and in-phase components on different subcarriers and at different moments of time. In the scheme with signal constellation rotation, the quadrature component should be transmitted not on the same subcarrier, but with a delay and on a different subcarrier. Then from one quadrature amplitude modulation is actually two amplitude binary modulation in-phase and quadrature projection, which are transmitted on independent subcarriers, and affected by interference differently, which provides reliable demodulation at lower values of the signal-to-noise ratio and the impact of industrial noise. A disadvantage of the algorithm is that it does not sufficiently counteract Gaussian noise.

Digital terrestrial television multimedia broadcasting; Matlab; Simulink; signal constellations; additive white Gaussian noise; bit error rate; modulation; coding.

Введение. Преимущества цифрового телевидения перед традиционным аналоговым можно суммировать следующим образом [1–3]:

1. Более высокая частотная эффективность.
2. Меньшее пороговое соотношение сигнал/шум.
3. Лучшая защита от помех и замираний.
4. Устойчивость к многолучевому приему и доплеровскому сдвигу.
5. Отсутствие шумов на изображении.
6. Мультиплексный метод передачи данных.

Недостатки стандартов цифрового телевидения, использующих OFDM.

1. Большая задержка сигнала, обусловленная алгоритмами ЦОС.
2. Высокие значения пик-фактора (PAPR).

Цифровые стандарты телевизионного вещания были приняты Международным союзом электросвязи (МСЭ) и коммерчески реализованы во многих странах и регионах мира. У этих стандартов уже появились новые версии; DVB-T предшествовал DVB-T2, DTMB предшествовал DTMB-A. В некоторых случаях наблюдается несовместимость с предыдущими версиями.

I. Постановка решаемой задачи. Стандарт DTMB основан на стандарте GB20600-2006 «Структура кадра, кодирование канала и модуляция для систем цифрового наземного телевидения» поддерживает скорость передачи данных полезной нагрузки от 4,813 Мбит/с до 32,486 Мбит/с. [5]. Этот стандарт поддерживает несколько коэффициентов FEC (0,4, 0,6, 0,8), чередование, тип несущей (мультинесущая и однонесущая), модуляцию (4QAM NR, 4QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM) и OFDM-заголовков (PN420, PN595, PN945) [1]. Тем не менее стандарт DTMB проигрывает стандарту DVB-T2 по требуемому соотношению сигнал/шум около 7 дБ, а также хуже противостоит промышленным помехам и имеет меньшую устойчивость сигнала в каналах с временными и частотно-селективными замираниями. В стандарте

DVB-T2 выигрыш достигается за счет использования вращающихся созвездий, в которых каждая I и Q компонента содержит достаточную информацию о передаваемом символе, в то время как I и Q каналы не являются независимыми друг от друга. Была поставлена задача создать модифицированные алгоритмы с поворотом сигнального созвездия, для применения в стандарте цифрового наземного телевизионного мультимедийного вещания, принятом на Кубе, для увеличения производительности системы в сложных условиях приема. Для проведения исследований была разработана собственная архитектура системы цифрового наземного телевизионного мультимедийного вещания, принятая на Кубе, реализованная в Simulink в среде Matlab. Ряд исследований показывает, что при использовании техники BICM-ID-SSD (системы кодовой модуляции с чередованием битов с итеративной демодуляцией и пространственным разнесением сигналов) [8], показанной на рис. 1, производительность системы в нескольких каналах с замираниями может быть существенно улучшена.

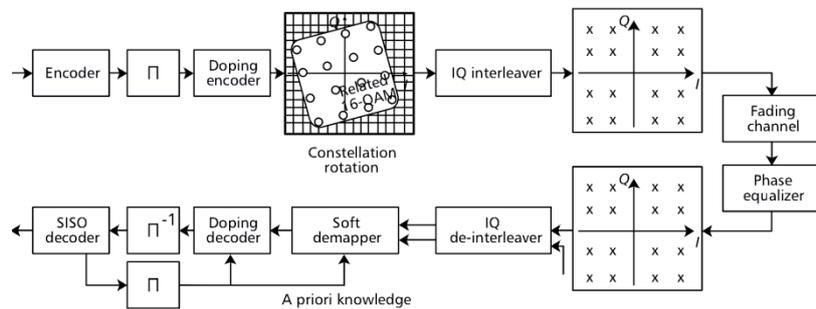


Рис. 1. Функциональная схема метода BICM-ID-SSD

Методика поворота созвездия, первоначально предложенная в [9] была широко изучена в литературе [10, 11]. В [9, 12, 13] она используется в каналах с глубокими частотными замираниями как метод улучшения порядка разнесения схем BICM (Кодированная модуляция с чередованием битов). На сайте [14–16] представлены исследования по применению этой техники в усовершенствованных кодерах с прямой коррекцией ошибок (FEC), таких как коды с низкой плотностью проверок на четность (LDPC). Как показано в [10], этот метод разнесения направлен на достижение избыточности информационных битов кодированной модуляции для улучшения характеристик приемника. Работы [17] основаны на поиске угла поворота, отличного от угла, определенного стандартом DVB T2. В [18] говорится о значении CR в одночастотных, многочастотных сетях и при включении методов агрегации каналов.

Известно, что для обнаружения обычного созвездия QAM (Квадратурная амплитудная модуляция) приемнику необходимы квадратурная (Q) и синфазная (I) составляющие каждой из принятых точек, чтобы определить, какая информация была передана. Это утверждение подтверждается тем, что оценка Q-компоненты не дает никакой информации о I-компоненте и наоборот; следовательно, обе компоненты, распространяющиеся по каналу на одной и той же несущей, испытывают одинаковые замирания.

Техника CR применяет вращение в комплексной плоскости к исходному созвездию, так что компоненты Q и I имеют достаточно информации, чтобы оценить, какой символ был передан.

CR не дает заметного улучшения, если I и Q несут одинаковые потери в затухающем канале, для преодоления этой трудности можно использовать так называемую Q-задержку. [18]. После вращения между компонентами I и Q выполняется процесс чередования, чтобы передать их на разных поднесущих и в разные моменты времени. На рис. 2 показан внешний вид оригинального созвездия (синие точки) и созвездия CR (красные точки). Показаны два примера: созвездие 16-QAM (a и b) и созвездие 64-QAM (c и d). Для CR число проекций на каждую ось равно M, в то время как если не используется обычный

m-QAM, число проекций равно \sqrt{M} . Поскольку DVB-T2 использует кодирование Грея, I и Q компоненты обычного созвездия могут быть отображены как два независимых M-PSK (*M-арная импульсная амплитудная модуляция*), [19]. На рис. 1 показано, что при использовании RC, получаются два связанных M-PSK.

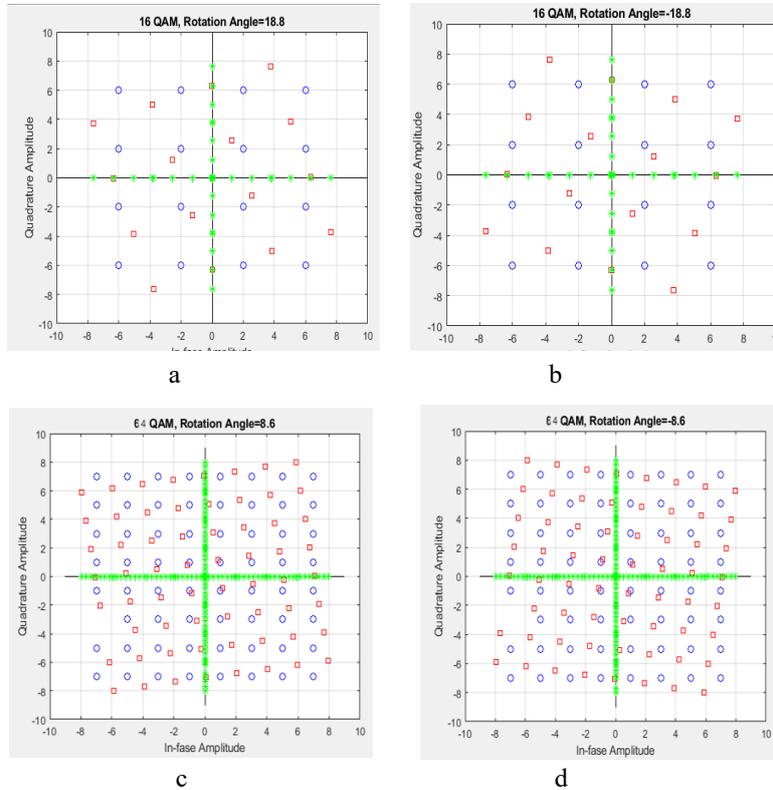


Рис. 2. Классическое и повернутое созвездие для 16-QAM (a, b) и 64-QAM (c, d)

II. Модель системы. Общая блок-схема сквозной системы DTMB показана на рис. 3.

В настоящем исследовании преследуются две основные цели:

1. Представить полученные результаты с теоретическими значениями, рекомендованными в [5] для каждого из анализируемых MODCOD.
2. Сравнить со значениями, которые могут быть предложены для того же MODCOD с учетом включения вращающихся созвездий.

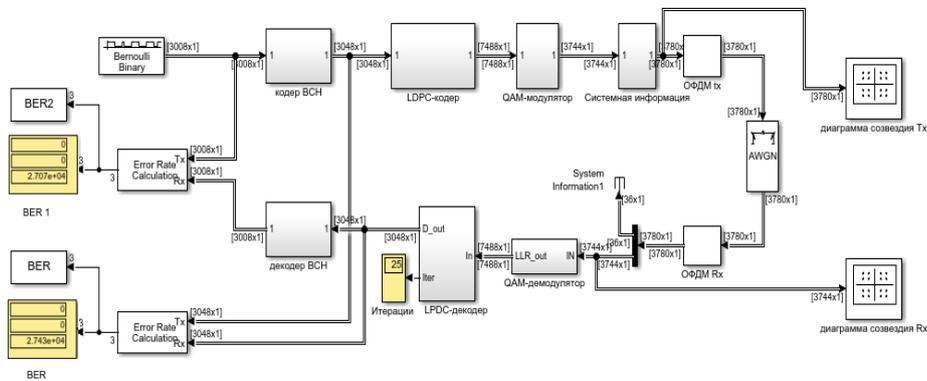


Рис. 3. Общая архитектура системы DTMB, реализованная в Matlab/Simulink

Интересно получить модель стандарта в Matlab Simulink, учитывая, что версии Matlab доступны исключительно с моделями типа (DVB-S.2 и DVB-T). Аналогичные работы по изучению стандартов в Simulink можно найти в литературе, например. [20, 21]. Кроме того, необходимо проследить за поведением этого стандарта в новых эволюционных моделях DTT в связи с анализом поведения SNR для различных конфигураций. Модель гауссовского шума (AWGN) широко применяется в исследованиях [17, 19, 22], поскольку она отличается низкой вычислительной сложностью и при этом достаточно точна для форматов модуляции с высокой кардинальностью.

AWGN – это просто шум, который влияет на передаваемый сигнал при прохождении через канал, когда он не связан с замираниями. Канал AWGN представлен:

$$r(t) = n(t) + s(t), \quad (1)$$

где $n(t)$ – AWGN, а $s(t)$ – передаваемый сигнал. Значения AWGN в любой момент времени идентично распределены и статистически независимы друг от друга. BER зависит от метода модуляции, SNR и скорости передачи данных.

Согласно [20] математически, M-QAM может быть записана как представлено в (2):

$$s_{kl}(t) = A_k \cos(2\pi f_c t + \theta_l), \quad (2)$$

где $k=1, 2, \dots, M_1, l=1, 2, \dots, M_2$,

где A_k – амплитуда сигнала, θ_l фаза сигнала, M_1 – число возможных амплитуд несущей, M_2 – число возможных фаз несущей, и f_c частота несущей. Комбинированная амплитудная и фазовая модуляция позволяет одновременно передавать $M_1 M_2$ битов на символ. Для двух цифровых сигналов (M-QAM), которые передаются путем изменения амплитуд двух несущих волн, коэффициент битовых ошибок определяется как:

$$BER = \frac{2}{m} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{m}}\right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{2mEb}{2(M-1)N}} \right) \sin \frac{\pi}{m}. \quad (3)$$

Для случая повернутых созвездий углы поворота принимаются равными углам, полученным по уравнению (4) и представленным в табл. 1. Однако в [19] представлены некоторые углы, которые являются более оптимальными.

$$\phi = \arctan(1/M^{1/2}) \quad (4)$$

$$\phi[\text{radianes}] = \arctan(1/M^{1/2}) * \pi/180. \quad (5)$$

Таблица 1

Углы поворота в стандарте DVB-T2

Углы/модуляции QAM	4QAM	16-QAM	64-QAM
Угол (градусы)	29.0	16.8	8.6
Угол (радианы)	0.506	0.293	0.150

III. Результаты моделирования. В данном исследовании моделирование включает в себя основные блоки обработки стандарта DTMB. Моделирование выполнено с использованием модели Simulink в Matlab. В основе моделирования лежит реализованная в Matlab симуляция DTMB с переменными параметрами (MODCOD: x-QAM, FEC).

На вход симуляции подается последовательность двоичного генератора случайных чисел с распределением Бернулли длиной 188 байт, которая эмулирует 188 байт транспортного потока (TS) после рассеивания энергии.

Первым шагом, независимо от проектирования равномерного созвездия или RC, является получение целевого значения SNR-target, для которого будет производиться проектирование.

Все моделирования были выполнены для порога $BER=10^{-3}$ и кодовых соотношений, предлагаемых стандартом DTMB для трех комбинаций FEC (0,4/0,6/0,8) в соответствии с [5].

На рис. 4 приведены значения SNR, полученные для определенных FEC (0.4, 0.6 и 0.8) и модуляций 4, 16 и 64 QAM, всего для этого эксперимента использовано 9 MODCOD. Мы выполнили распределение белого шума Гаусса для сигнала DTMB, генерируемого OFDM в различных методах MODCOM, чтобы показать представление вероятности битовой ошибки как функции отношения с/ш в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Значения MODCOD для различных режимов работы DTMB

Модулятор/демодулятор	m-QAM / FEC	Модулятор/демодулятор	m-QAM / FEC
MODCOD 1	4QAM / 0,4 FEC	MODCOD 6	16QAM/0,8
MODCOD 2	4 QAM / 0,6	MODCOD 7	64QAM/0,4
MODCOD 3	4QAM/0,8	MODCOD 8	64QAM/0,6
MODCOD 4	16 QAM /0,4	MODCOD 9	64QAM/0,8
MODCOD 5	16QAM /0,6		

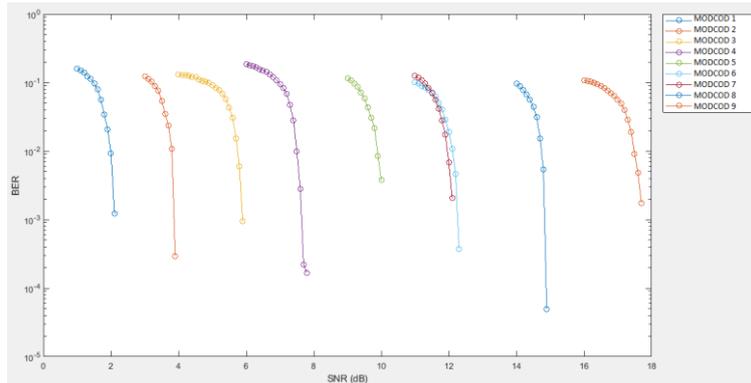
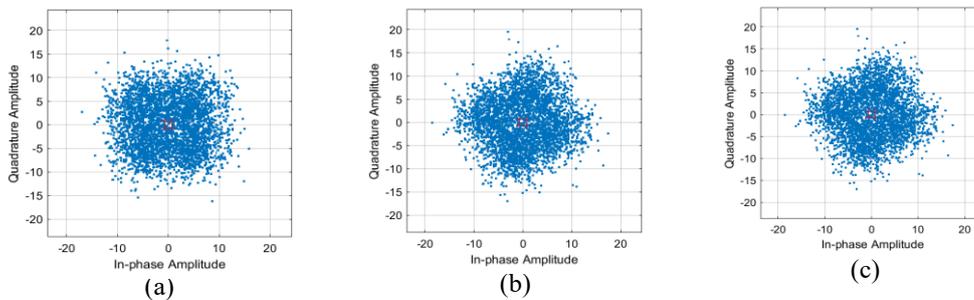


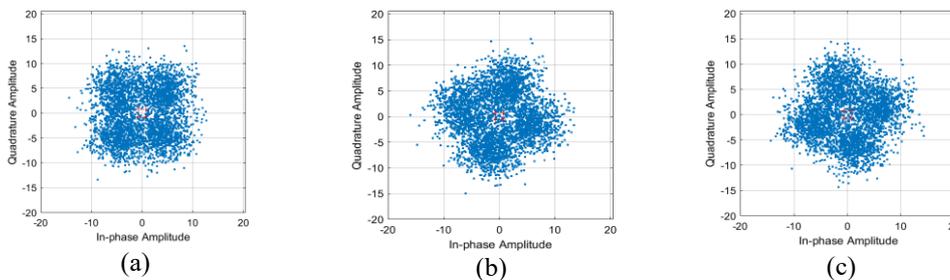
Рис. 4. Зависимость BER от SNR для различных MODCOD стандарта DTMB

С учетом чередования модуляций представлены результаты для различных MODCOD для получения SNR_{min} и BER_{max}. Для моделирования в 2 секунды варьируется значение (SNR) и получаются диаграммы созвездий, рис. 5.

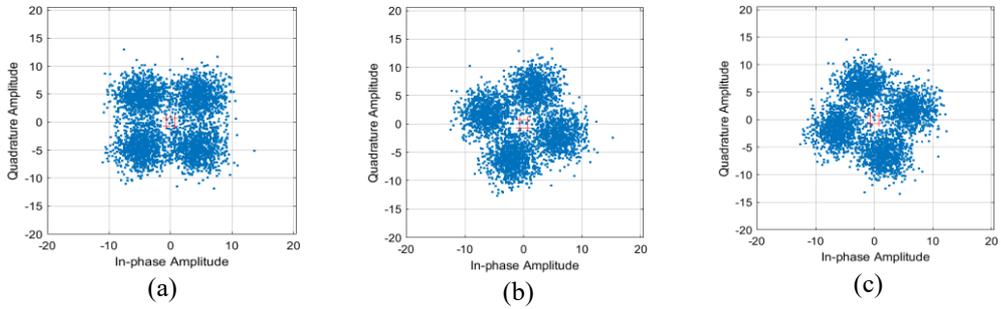
MODCOD (4QAM и FEC 0,4), SNR=2,3 дБ, расстояние = 9
Фаза = 0 рад (а), фаза = 0,506 рад (b), фаза = - 0,506 рад (с)



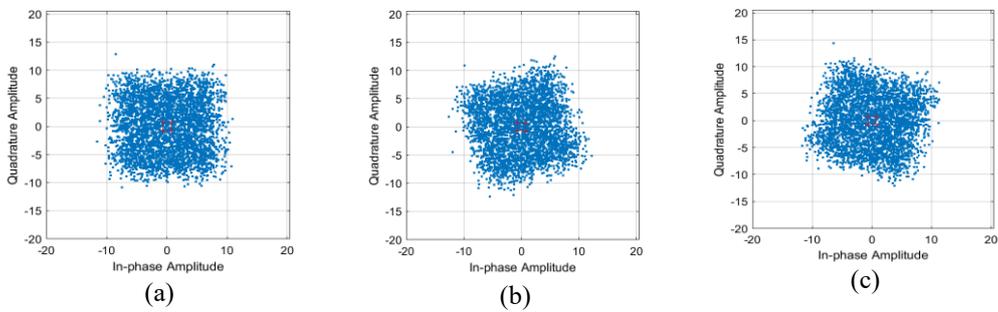
MODCOD (4QAM и FEC 0,6), SNR=4,3 дБ, расстояние = 9
Фаза = 0 рад (а), фаза = 0,506 рад, (b) фаза = - 0,506 рад (с)



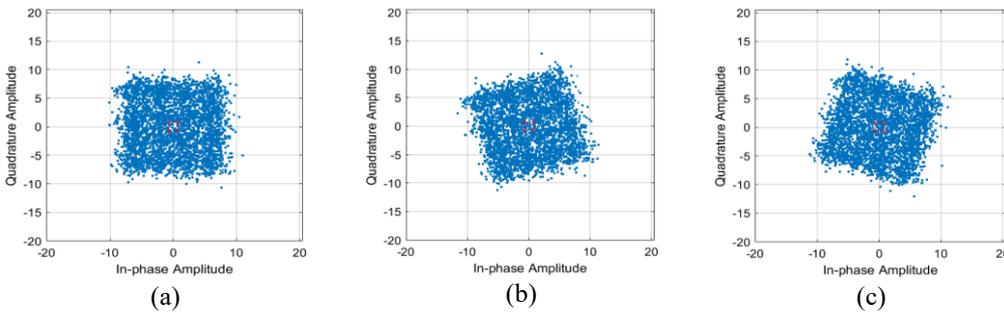
MODCOD (4QAM и FEC 0,8), SNR = 6,2 дБ, расстояние = 9
 Фаза = 0 рад (a), фаза = 0,506 рад (b), фаза = - 0,506 рад (c)



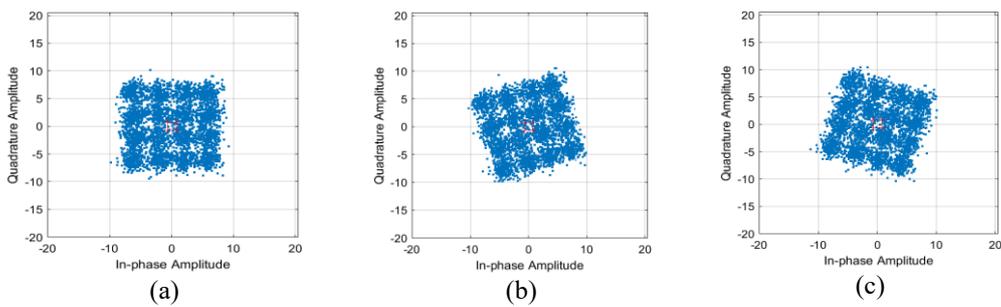
MODCOD (16QAM и FEC 0,4), SNR = 8 дБ, расстояние = 4
 Фаза = 0 рад (a), фаза = 0,293 рад (b), фаза = - 0,293 рад (c)



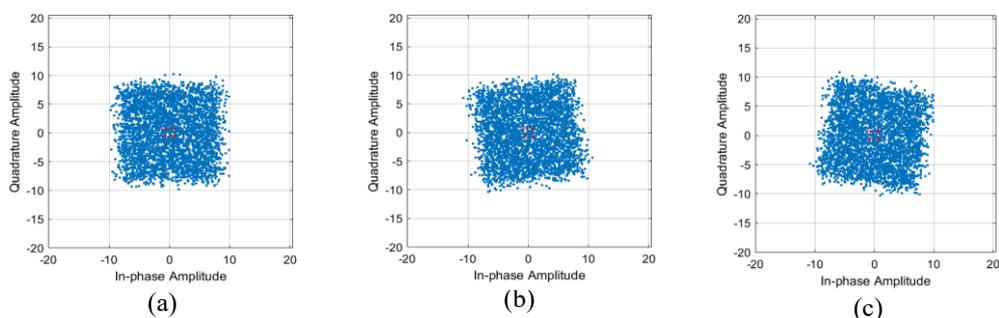
MODCOD (16QAM и FEC 0,6), SNR=10,3 дБ, расстояние = 4
 Фаза = 0 рад (a), фаза = 0,293 рад (b), фаза = - 0,293 рад (c)



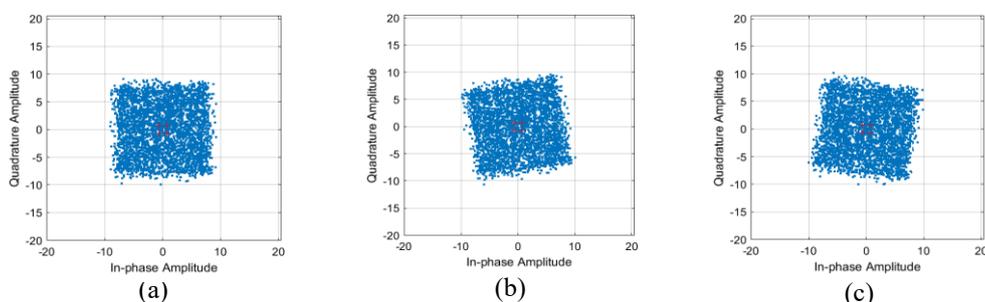
MODCOD (16QAM и FEC 0,8), SNR=12.5 дБ, расстояние = 4
 Фаза = 0 рад (a), фаза = 0,293 рад (b), фаза = - 0,293 рад (c)



MODCOD (64QAM и FEC 0,4), SNR=12,5 дБ, расстояние = 2
 Фаза = 0 рад (а), фаза = 0,150 рад (b), фаза = - 0,150 рад (с)



MODCOD (64QAM и FEC 0,6), SNR= 15,2 дБ
 Фаза = 0 рад (а), фаза = 0,150 рад (b), фаза = - 0,150 рад (с)



MODCOD (64QAM и FEC 0,8), SNR=18 дБ
 Фаза = 0 рад (а), фаза = 0,150 рад (b), фаза = - 0,150 рад (с)

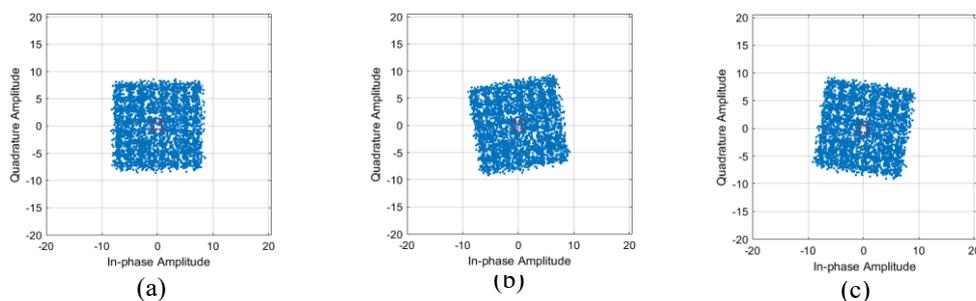


Рис. 5. Представление созвездий для различных MODCOD и SNR-target

Согласно полученным результатам, использование RC не дает существенного выигрыша в SNR для стандарта DTMB для SNR-target ни в одном из используемых созвездий, независимо от их скорости кодирования.

Установлено, что использование вращающегося созвездия в DTMB не дает ни потерь, ни выигрышей в производительности при гауссовском шуме в канале.

Результаты, представленные на рис. 6, подтверждают, что, хотя BER на уровне 10^{-3} не был достигнут, получены очень близкие значения SNR. Однако, для получения существенного выигрыша от поворота созвездия, порядка 7 Дб, компоненты I и Q нужно передавать на разных поднесущих и в разные моменты времени. При ротированной схеме Q-компонент нужно передавать не на той же самой поднесущей (ячейке), а с задержкой и на другой поднесущей в другой ячейке (рис. 6. и 7). Тогда из одной QAM получается

фактически две ASK-модуляции (Amplitude Shift Keying) в I и Q-направлении, которые передаются на независимых поднесущих, и поражаются помехами по-разному, что обеспечивает надежность демодуляции при более низких значения SNR [6].

Кроме того, в табл. 3 приведены результаты для значений BER, полученных для SNR-target, и для значений целевого SNR, уменьшенных от 1 до 3 дБ. Понятно, что, например, для MODCOD 3 с SNR-target = 6,2 дБ, расчеты были выполнены для значений между 3,3 и 6,3 дБ для различных вероятностей битовых ошибок.

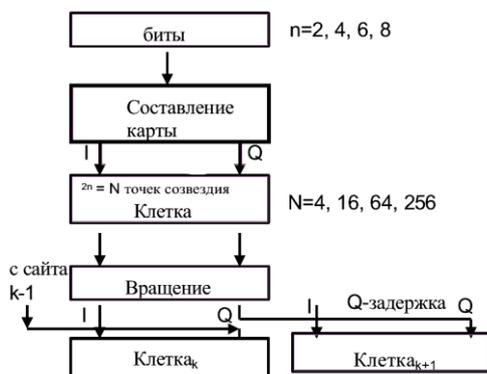


Рис. 6. Сопоставление, поворот и задержка Q



Рис. 7. Циклическая задержка Q между соседними ячейками

Таблица 3

Представление результатов моделирования системы DTMB в условиях AWGN с CR и без CR для 4QAM, 16 QAM и 64 QAM

Модулятор/ Демодулятор	SNR-target	BER для (SNR-target)	BER для (SNR-target- 1dB)	BER для (SNR-target- 2dB)	BER для (SNR-target- 3dB)
MODCOC 1	2.3	0.01441	0.1084	0.2247	0.261
		10^{-3}	0.1084	0.2247	0.261
MODCOC 2	4.3	10^{-3}	0.1015	0.176	0.2254
			0.1217	0.2182	0.2586
MODCOC 3	6.2	10^{-3}	0.04422	0.115	0.1599
			0.04555	0.114	0.1504
MODCOC 4	8	10^{-3}	0.1021	0.1922	0.2447
			0.1048	0.1905	0.2503
MODCOC 5	10.3	10^{-3}	0.08378	0.1676	0.2136
			0.08341	0.1672	0.2152
MODCOC 6	12.5	10^{-3}	0.0668	0.1211	0.142
			0.1177	0.1365	0.1559
MODCOC 7	12.5	10^{-3}	0.1310	0.1734	0.2193
			0.101	0.1718	0.2217
MODCOC 8	5.2	10^{-3}	0.8929	0.1543	0.1927
			0.0942	0.1572	0.1867
MODCOC 9	18	10^{-3}	0.07548	0.114	0.1308
			0.07746	0.119	0.1316

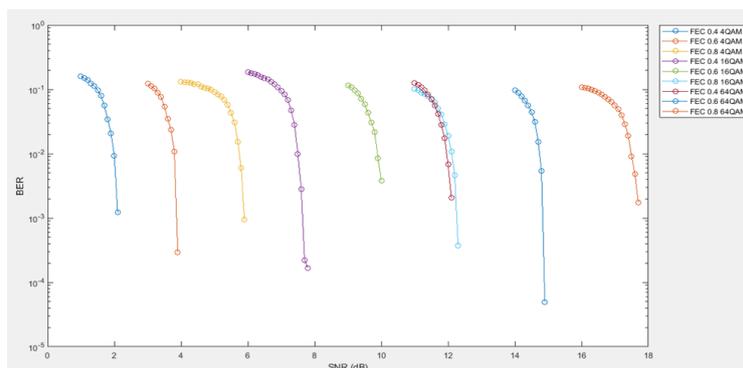


Рис. 8. Зависимость BER от SNR для различных MODCOD стандарта DTMB после включения вращающихся созвездий

В табл. 3, для каждого из определенных MODCOD значения, полученные для положительных фаз, показаны в верхней строке, а для отрицательных – в нижней. Для MODCOD 1 значения BER для фазы и противофазы равны. В ряде случаев положительные фазы работают лучше, чем отрицательные. Значения BER, полученные для MODCOD 3, 6 и 9, лучше, чем для 1, 4 и 7, и это является функцией использования более избыточного FEC; это не относится к MODCOD 6 с отрицательной фазой.

Закключение. В результате проведенных экспериментов, и теоретических изысканий было установлено, что угол, полученный при моделировании для RC, совпадает с углом, который приводит к выравниванию проекций на оси. В моделировании было реализовано использование техники пространственного разнесения сигнала в стандарте DTMB. Показаны результаты для 9 конфигураций MODCOD, повернутых на шесть различных углов. Предложенные модификации позволяют принимать сигнал DTMB в каналах без замираний при равных значениях BER для всех анализируемых случаев. Также, для получения существенного выигрыша от поворота созвездия, порядка 7 Дб, компоненты I и Q предложено передавать на разных поднесущих и в разные моменты времени. Таким образом при схеме с поворотом сигнального созвездия, Q-компоненту предложено передавать не на той же самой поднесущей, а с задержкой и на другой поднесущей. Тогда из одной QAM фактически получается две ASK-модуляции в I и Q-проекции, которые передаются на независимых поднесущих, и поэтому поражаются помехами по-разному. Это обеспечивает надежность демодуляции при более низких значениях SNR и воздействии промышленных помех.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ITU-R, Handbook on Digital Terrestrial Television Broadcasting Networks and Systems Implementation, 2016.
2. Song J., Yang Z., and Wang J., Eds. Digital Terrestrial Television Broadcasting: Technology and System. Hoboken, NJ, 2015.
3. OECD, Digital Terrestrial Television Broadcasting in the VHF/UHF Bands: DTTB Handbook. Paris. 2013. Available at: <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/pub-800c9499-en>.
4. ETSI EN 300 744, European Standard, 2008, 9. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300700_300799/300744/01.06.01_40/en_300744v010601o.pdf.
5. Chinese standards GB 20600-2006. Available at: <https://www.chinesestandard.net/Related.aspx/GB20600-2006>.
6. Walter Fischer. Digital Video and Audio Broadcasting Technology A Practical Engineering Guide. Third Ed. Springer Heidelberg Dordrecht London New York. 2010, 828 p.
7. ETSI EN 302 755, European Standard, 2012, 4. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302700_302799/302755/01.03.01_60/en_302755v010301p.pdf.
8. Dai L., Wang Z., and Yang Z. Next-generation digital television terrestrial broadcasting systems: Key technologies and research trends, *IEEE Commun. Mag.*, Jun. 2012, Vol. 50, No. 6, pp. 150-158. DOI: 10.1109/MCOM.2012.6211500.

9. *Chindapol A. and Ritcey J.A.* Design, analysis, and performance evaluation for BICM-ID with square QAM constellations in Rayleigh fading channels, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, May 2001, Vol. 19, No. 5, pp. 944-957. DOI: 10.1109/49.924878.
10. *Gonzalez D., Gimenez J.J., Gomez-Barquero D., and Cardona N.* Rotated Constellations for Improved Time and Frequency Diversity in DVB-NGH, *IEEE Transactions on Broadcasting*, Jun. 2013. DOI: 10.1109/TBC.2013.2252862.
11. *Boutros J. and Viterbo E.* Rotated multidimensional QAM constellations for Rayleigh fading channels, 2017, 9. Available at: <https://engit.monash.edu/profiles/wp-content/uploads/2017/09/itw96.pdf>.
12. Improving BICM Efficiency for DVB-T2 System using Rotated Constellations and Cyclic Q Delay, TRKU-08-02-2021-11416, Vol. 63, No. 02.
13. *Suwansukho N. and Promwong S.* Evaluation of Rotated Constellation in DVB-T2 Based on Measurement Data, in *2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST), Luang Prabang, Laos: IEEE, Jul. 2019*, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICEAST.2019.8802572.
14. *Sun J., Liu H., and Ma X.* Transmitting Extra Bits by Rotating Signal Constellations. Aug. 28, 2020. DOI: 10.48550/arxiv.2008.10818.
15. *Honfoga A.C., Dossou M., and Moeyaert V.* Low complexity demapping algorithms survey in DVB-T2: Rotated constellation case study, 2022, Vol. 6, No. 1.
16. *Polak L. and Kratochvil T.* Comparison of the non-rotated and rotated constellations used in DVB-T2 standard, *Proceedings of 22nd International Conference Radioelektronika. 2012, Apr. 2012*, pp. 1-4. Accessed: Dec. 18, 2023. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6207641>.
17. *Regis C.D.M., Ferreira Mota M., Fernandes Lopes R., and Sampaio de Alencar M.* Performance Analysis of a 64-QAM Rotated Constellation Subject to Rice Fading, in *SIMPOSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAC, 'OES, 2012*.
18. Planning aspects of DVB-T2 - EBU TECH3348 - May 2011.pdf. Dec. 17, 2023. Available at: https://tech.ebu.ch/docs/news/2012_01/wrcdocs/Planning%20aspects%20of%20DVB-T2%20-%20EBU%20TECH3348%20-%20May%202011.pdf.
19. *Agani D., Honfoga A.-C., and Sotindjo P.* Optimal M-QAM rotated constellation angle in DVB-T2, *2022 5th International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet), Marrakech, Morocco: IEEE, Dec. 2022*, pp. 1-6. DOI: 10.1109/CommNet56067.2022.9993827.
20. *Youssef T. and Abdelfattah E.* Performance evaluation of different QAM techniques using Matlab/Simulink, *2013 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT), Farmingdale, NY, USA: IEEE, May 2013*, pp. 1–5. DOI: 10.1109/LISAT.2013.6578237.
21. *Sadinov S.M.* Simulation study of M-ARY QAM modulation techniques using Matlab/Simulink, *2017 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia: IEEE, May 2017*, pp. 547-554. DOI: 10.23919/MIPRO.2017.7973486.
22. *Shah S.M., Riyaz R., Wani T.M., Ashraf A., and Naz S.F.* Optimal rotation angle for finite constellation over additive white Gaussian noise multiple access wiretap channel, *IET Commun.*, 2020, Vol. 14, No. 21, pp. 3845-3852. DOI: 10.1049/iet-com.2019.0244.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.А. Кравченко.

Мелешкин Сергей Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: snmeleshkin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79287797415; кафедра встраиваемых и радиоприемных систем; к.т.н.; доцент.

Силес Ирина Бенигновна – Центральный университет Лас-Вильяс Марта Абреу; e-mail: irinass@uclv.edu.cu; г. Санта-Клара, Вилла-Клара, Куба; тел.: +5342281178; кафедра телекоммуникационных технологий; аспирант.

Meleshkin Sergey Nikolaevich – Southern Federal University; e-mail: snmeleshkin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79287797415; the Department of Embedded and Radio Receiving systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Siles Irina Benignovna – Central University of Las Villas Marta Abreu; e-mail: irinass@uclv.edu.cu; Santa Clara, Villa Clara, Cuba; phone: +5342281178; the Department of Telecommunication Technologies; graduate student.

К.Е. Румянцев, Я.К. Миронов, П.Д. Миронова

**ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХЭТАПНОГО АЛГОРИТМА
СИНХРОНИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ВЫБОРА СМЕЖНОЙ ПАРЫ СЕГМЕНТОВ
С МАКСИМАЛЬНЫМ СУММАРНЫМ ОТСЧЁТОМ В СИСТЕМЕ КРК**

Предложен двухэтапный алгоритм синхронизации на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом в системе КРК. В основе алгоритма известный подход к уменьшению времени вхождения в синхронизм – анализ смежных пар временных сегментов. Отличительной особенностью предложенного алгоритма является обеспечение вероятности успешного поиска и тестирования не хуже требуемого уровня. Необходимо отметить, благодаря этапу тестирования производится отбраковка ошибочных решений, принятых на этапе поиска, что позволяет минимизировать вероятность ложной синхронизации вследствие регистрации шумовых импульсов. На этапе поиска аппаратура последовательно регистрирует суммарные отсчёты со всех смежных пар сегментов. Далее выбирается пара сегментов с максимальным суммарным отсчётом, причём отсчёт в одной из пар сегментов надёжно превышает значения отсчётов со всех других пар сегментов, и аппаратура переходит к этапу тестирования. Тестирование состоит в опросе фотодетектора в течение импульса стробирования для повторной регистрации отсчёта. В случае положительного тестирования процесс «грубой» оценки момента приёма синхроимпульса считается успешно завершённым, в противном случае – аппаратура возвращается к поиску в следующем кадре. Отметим, этапам поиска и тестирования соответствуют предельно допустимые числа кадров и тестов соответственно. Получены аналитические выражения для расчёта временных и вероятностных характеристик этапов поиска и тестирования предложенного алгоритма обнаружения на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом, в том числе для расчёта допустимого числа кадров и тестов при обеспечении требуемых вероятностей успешного поиска и тестирования соответственно. Установлено, при увеличении среднего числа фотонов в синхроимпульсе средние числа кадров и тестов, а также среднее время успешного поиска и тестирования значительно снижаются. Например, при увеличении среднего числа фотонов в синхроимпульсе в 5 раз среднее число тестов для успешного тестирования и среднее время успешного тестирования уменьшаются в 1,5 раза, а допустимое число тестов – в 5 раз.

Квантовое распределение ключа; синхронизация; максимальный суммарный отсчёт; вероятностные характеристики.

K.Ye. Rumyantsev, Ya.K. Mironov, P.D. Mironova

**EVALUATION OF THE CHARACTERISTICS OF A TWO-STAGE
SYNCHRONIZATION ALGORITHM BASED ON THE SELECTION
OF AN ADJACENT PAIR OF SEGMENTS WITH THE MAXIMUM TOTAL COUNT
IN THE QKD SYSTEM**

A two-stage synchronization algorithm is proposed based on the selection of an adjacent pair of segments with the maximum total count in the QKD system. The algorithm is based on a well-known approach to reducing the time of entering into synchronism - the analysis of adjacent pairs of time segments. A distinctive feature of the proposed algorithm is to ensure that the probability of successful search and testing is not worse than the required level. It should be noted that due to the testing stage, erroneous decisions made at the search stage are rejected, which minimizes the probability of false synchronization due to the registration of noise pulses. At the search stage, the equipment sequentially registers the total counts from all adjacent pairs of segments. Next, a pair of segments with the maximum total count is selected, and the count in one of the pairs of segments reliably exceeds the values of the counts from all other pairs of segments, and the equipment proceeds to the testing stage. Testing consists of polling the photodetector during the gating pulse to re-register the count. In case of positive testing, the process of «rough» estimation of the moment of reception of the sync pulse is considered successfully completed, otherwise the equipment returns to the search in the next frame. Note that the maximum allowable number of frames and tests correspond to the search and testing stages, respectively. Analytical expressions are obtained for calculating the time and probabilistic characteristics of the search and testing stages of the proposed detection algorithm based on the selection of an adjacent pair of segments with the maximum total count, including for calculating the allowable number of frames and tests while ensuring the required

probabilities of successful search and testing, respectively. It has been found that with an increase in the average number of photons in the sync pulse, the average number of frames and tests, as well as the average time of successful search and testing, decrease significantly. For example, when the average number of photons in a sync pulse increases by 5 times, the average number of tests for successful testing and the average time for successful testing decrease by 1.5 times, and the permissible number of tests by 5 times.

Quantum key distribution; synchronization; maximum total count; probabilistic characteristics.

Введение. Применение систем квантового распределения ключа (КРК) позволяет обеспечить абсолютную безопасность передаваемых данных между легитимными пользователями. В общем случае система КРК состоит из приёмопередающей и кодирующей станций, генерирующих секретный ключ посредством квантового канала, а также подсистемы синхронизации. Эффективное КРК невозможно без стабильной и точной синхронизации станций [1–6]. Известные исследования подсистем синхронизации в системах КРК направлены на повышение безопасности процесса синхронизации, увеличение протяжённости линии связи и быстродействия [7–17]. Однако обеспечение секретности процесса синхронизации накладывает значительные ограничения на дальность связи и время вхождения в синхронизм.

Известен подход к снижению времени синхронизации приёмопередающей и кодирующей станций системы КРК, заключающийся в анализе смежных пар сегментов, причём длительность одного временного сегмента равна длительности синхроимпульса [17]. В указанном подходе принятие решения об обнаружении синхроимпульса осуществляется посредством сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем, либо путём поиска смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом.

Предлагается алгоритм «грубой» оценки момента приёма синхросигнала, предполагающий поиск номера сигнальной смежной пары сегментов, на основе поиска смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом с добавлением этапа тестирования для отбраковки ошибочных решений на этапе поиска. Отличительной особенностью данного алгоритма является сравнение суммарного отсчёта со смежной пары сегментов не с пороговым уровнем, как в алгоритме аналоге [18, 19], а с отсчётами с других смежных пар сегментов и выбор пары сегментов с максимальным отсчётом. Данная особенность позволяет упростить поиск сигнальной смежной пары сегментов, исключая необходимость расчёта и выбора порогового уровня.

Оценка временных и вероятностных характеристик этапов поиска и тестирования двухэтапного алгоритма синхронизации на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом. Алгоритм предполагает оценку момента приёма синхроимпульса посредством двух последовательных этапов. Временной интервал, равный периоду следования синхроимпульсов T_s , делится на N_w временных сегментов, причём длительность одного временного сегмента равна длительности синхроимпульса $\tau_w = \tau_s$, поэтому анализ сегментов проводится попарно ввиду возможного нахождения синхроимпульса на границе двух смежных сегментов.

На рис. 1 представлена операция «грубой» оценки момента приёма синхроимпульса в 1-м временном кадре. Цель «грубой» оценки заключается в поиске сигнальной смежной пары сегментов. Операция подразделяется на два этапа – поиск и тестирование. На этапе поиска аппаратура последовательно, начиная с 1-й пары смежных сегментов, регистрирует суммарный отсчёт с каждой пары сегментов. После анализа всех пар сегментов в кадре выбирается пара сегментов с максимальным суммарным отсчётом, причём отсчёт в одной из пар сегментов надёжно превышает значения отсчётов со всех других пар сегментов. Далее аппаратура переходит на этап тестирования, задача которого состоит в опросе фотодетектора в течение импульса стробирования для повторной регистрации отсчёта. В случае повторной регистрации (превышения суммарным отсчётом порогового уровня) этап тестирования завершается, аппаратура переходит к «точной» оценке (выход 2 на рис. 1). В случае отрицательного тестирования аппаратура возвращается к поиску в следующем кадре (выход 1 на рис. 1). При отсутствии обнаружения синхроимпульса в течение анализа всех смежных пар сегментов в кадре аппаратура переходит к поиску в следующем кадре (выход 1 на рис. 1). Отметим, этапам поиска и тестирования соответ-

вуют предельно допустимые числа кадров $N_{T,2}$ и тестов $N_{test,2}$ соответственно. При отсутствии обнаружения синхроимпульса в течение допустимого числа кадров $N_{T,2}$ процесс синхронизации начинается с начала.

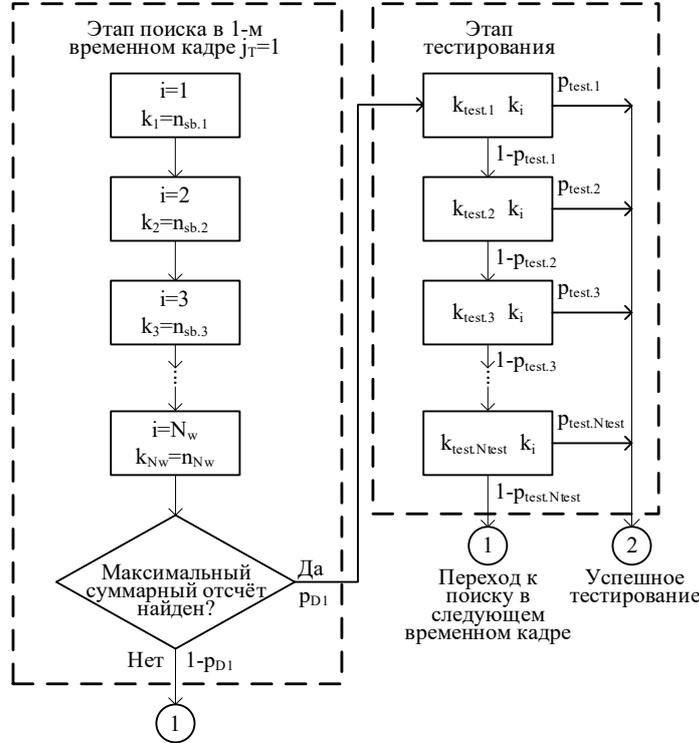


Рис. 1. Операция «грубой» оценки момента приёма синхроимпульса в 1-м кадре на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом

Определим допустимые числа кадров и тестов. Вероятность обнаружения синхроимпульса на этапе поиска в кадре может быть найдена по формуле [20]

$$p_{D1,2} = \sum_{k_1=1}^{\infty} \left\{ Pos(k_1, \bar{k}_s) \cdot \left[\sum_{k_2=0}^{k_1-1} Pos(k_2, \bar{k}_b) \right]^{N_w-1} \right\},$$

где $\bar{k}_s = \bar{n}_s + \bar{k}_b = \bar{n}_s + 2\bar{n}_b$ – сумма сигнальных и шумовых импульсов в анализируемой смежной паре сегментов.

Используя метод математической индукции, находим условную вероятность обнаружения синхроимпульса в j_T -м временном кадре

$$p_{D,2}\{j_T\} = (1 - p_{D1,2})^{j_T-1} \cdot p_{D1,2}.$$

Используя свойства геометрической прогрессии, безусловная вероятность обнаружения синхроимпульса на этапе поиска с числом кадров $N_{T,2}$ равна

$$P_{D,2} = \sum_{j_T=1}^{N_{T,2}} p_{D,2}\{j_T\} = 1 - (1 - p_{D1,2})^{N_{T,2}}.$$

Таким образом, для обеспечения заданной вероятности обнаружения $P_{D,2}$ при известной вероятности $p_{D1,2}$ потребуется анализ не менее $N_{T,2,min}$ кадров

$$N_{T,2} \geq N_{T,2,min} = \left\lceil \frac{\lg(1 - P_{D,2})}{\lg(1 - p_{D1,2})} \right\rceil.$$

Учитывая, что для принятия решения аппаратурой о результате поиска необходимо проанализировать все смежные пары сегментов во временном кадре, то время, затраченное на этапе поиска в текущем кадре, будет равно $t_{search.j_T} = T_s$.

Среднее число кадров для успешного обнаружения на этапе поиска

$$\overline{N_{T,2}} = \sum_{j_T=1}^{N_{T,2}} j_T \cdot (1 - p_{D1,2})^{j_T-1} \cdot p_{D1,2}$$

определяет среднее время $\overline{T_{search.2}} = T_s \cdot \overline{N_{T,2}}$.

Результаты расчёта характеристик этапа поиска в предлагаемом алгоритме представлены в табл. 1. Обеспечиваемые вероятности обнаружения на этапах поиска и тестирования равны $P_{D,2} \geq 0,99$ и $P_{test.2} \geq 0,99$. Протяжённость волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) составляет 20 км, что соответствует периоду следования $T_s = 195,76$ мкс. Следовательно, число сегментов и смежных пар сегментов равно $N_w = 652553$. При ориентации на отклонение в $K_{pD1}=1,1$ раза от предельной вероятности синхронизации $p_{D1.lim2}$ и частоте генерации импульсов темнового тока (ИТТ) $f_{DCR} = 10$ Гц пороговый уровень равен $k_{th} = 1$. Отметим, по методике расчёта порогового уровня реально достижимая вероятность ложного срабатывания при ориентации на $k_{th} = 1$ составляет $p_{th.b} = 6 \cdot 10^{-9}$.

Обеспечение вероятности успешного обнаружения на этапе поиска $P_{D,2} \geq 0,99$ достигается за счёт последовательного анализа смежных пар сегментов в течение допустимого числа кадров $N_{T,2}$. Полученные результаты указывают на значительное снижение числа кадров $N_{T,2}$ при увеличении среднего числа фотонов в синхроимпульсе $\overline{n_s}$. Так, при $\overline{n_s} = 1$ для достижения $P_{D,2} \geq 0,99$ потребуется 5 кадров, при $\overline{n_s} = 2 - 3$ кадра, а при $\overline{n_s} \geq 5$ - всего 1 кадр. В целом увеличение среднего числа фотонов в синхроимпульсе в 5 раз (с 1 до 5) позволяет снизить допустимое число кадров также в 5 раз (с 5 до 1). Значительное снижение числа кадров по мере роста $\overline{n_s}$ обусловлено увеличением отношения среднего числа фотонов в синхроимпульсе к среднему числу шумовых импульсов за длительность пары сегментов $\overline{n_s}/(2\overline{n_b})$, и, следовательно, повышением вероятности обнаружения синхроимпульса в кадре $p_{D1,2}$. Соответственно, с ростом среднего числа фотонов $\overline{n_s}$ в связи со значительным снижением допустимого $N_{T,2}$ и среднего $\overline{N_{T,2}}$ чисел кадров уменьшается также и среднее время успешного поиска $\overline{T_{search.2}}$. Среднее время $\overline{T_{search.2}}$ достигает максимального значения при $\overline{n_s} = 1$ и составляет $\overline{T_{search.2}}=301,54$ мкс. Однако при $\overline{n_s} \geq 3$ скорость изменения среднего времени успешного поиска снижается и стремится к 0. Увеличение среднего числа фотонов в синхроимпульсе с 1 до 2 позволяет уменьшить среднее время успешного поиска на 25,5% (301,54 против 224,61 мкс), при увеличении среднего числа фотонов с 2 до 3 - на 8,9% (224,61 против 204,63 мкс), а при увеличении среднего числа фотонов с 3 до 4 различие составляет всего 2,6% (204,63 против 199,27 мкс).

Таблица 1

Результаты расчёта параметров этапа поиска

$\overline{n_s}$	Среднее число фотонов в синхроимпульсе				
	1	2	3	4	5
$100p_{D1,2}$	63,07	86,36	94,96	98,14	99,31
$N_{T,2}$	5	3	2	2	1
$\overline{N_{T,2}}$	1,540	1,147	1,045	1,018	0,993
$\overline{T_{search.2}}$, мкс	301,54	224,61	204,63	199,27	194,42
$\overline{n_s}$	Среднее число фотонов в синхроимпульсе				
	6	7	8	9	10
$100p_{D1,2}$	99,75	99,91	99,97	99,99	100,00
$N_{T,2}$	1	1	1	1	1
$\overline{N_{T,2}}$	0,997	0,999	1,00	1,00	1,00
$\overline{T_{search.2}}$, мкс	195,26	195,58	195,69	195,73	195,75

При переходе аппаратуры на этап тестирования повторный опрос фотодетектора производится в течение допустимого числа тестов $N_{test.2}$, пока не произойдет превышения суммарным отчётом со смежной пары сегментов порогового уровня или не закончится допустимое число тестов. Длительность стробирующего импульса определяется удвоенной длительностью синхроимпульса $\tau_{strob} = 2 \cdot \tau_s$, что соответствует длительности смежной пары сегментов. Следовательно, среднее число шумовых импульсов за длительность импульса стробирования будет равно $2 \cdot \bar{n}_b$.

Вероятность повторной регистрации синхроимпульса на этапе тестирования за 1-й тест может быть найдена по формуле

$$p_{test1.2} = p_{th.s} = \sum_{k_1=k_{th}}^{\infty} Pos(k_1, \bar{k}_s).$$

Условная вероятность повторной регистрации синхроимпульса при k_{test} -м тестировании

$$p_{test.2}\{k_{test}\} = (1 - p_{test1.2})^{k_{test}-1} p_{test1.2}.$$

Безусловная вероятность успешного тестирования при допустимом числе тестов $N_{test.2}$ равна

$$P_{test.2} = \sum_{k_{test}=1}^{N_{test.2}} p_{test.2}\{k_{test}\} = \frac{p_{test1.2}}{1 - p_{test1.2}} \sum_{k_{test}=1}^{N_{test.2}} (1 - p_{test1.2})^{k_{test}}.$$

Используя свойства геометрической прогрессии, находим

$$P_{test.2} = 1 - (1 - p_{test1.2})^{N_{test.2}}.$$

Для обеспечения заданной вероятности успешного тестирования $P_{test.2}$ при произвольной вероятности $p_{test1.2}$ потребуется не менее $N_{test.2.min}$ тестов:

$$N_{test.2} \geq N_{test.2.min} = \left\lceil \frac{\lg(1 - P_{test.2})}{\lg(1 - p_{test1.2})} \right\rceil.$$

Затраченное время в случае успешного тестирования при повторной регистрации в смежной паре сегментов в течение k_{test} -го теста равно $T_{test.2} = T_s \cdot k_{test}$, в противном случае, при отрицательном результате тестирования время равно $T_{test.2} = T_s \cdot N_{test.2}$.

Среднее число тестов для успешного тестирования определяется формулой

$$\bar{N}_{test.2} = \sum_{k_{test}=1}^{N_{test.2}} k_{test} \cdot (1 - p_{test1.2})^{k_{test}-1} \cdot p_{test1.2}.$$

При этом среднее время тестирования будет равно $\bar{T}_{test.2} = T_s \cdot \bar{N}_{test.2}$.

Результаты расчёта характеристик этапа тестирования в предлагаемом алгоритме представлены в табл. 2. Требуемая безусловная вероятность успешного тестирования составляет $P_{test.2} \geq 0,99$. Протяжённость ВОЛС составляет 20 км, что соответствует периоду следования $T_s = 195,76$ мкс. Следовательно, число сегментов и, соответственно, смежных пар сегментов равно $N_w = 652553$. При ориентации на отклонение в $K_{pD1}=1,1$ раза от предельной вероятности синхронизации $p_{D1.lim2}$ и частоте генерации ИГТ $f_{DCR} = 10$ Гц пороговый уровень равен $k_{th} = 1$, а вероятность ложного срабатывания $p_{th.b} = 6 \cdot 10^{-9}$.

Отметим, увеличение среднего числа фотонов в синхроимпульсе позволяет достичь вероятности успешного тестирования $P_{test.2} \geq 0,99$ при минимально допустимом числе тестов, и, следовательно, значительно уменьшить время тестирования. Так, при увеличении среднего числа фотонов в синхроимпульсе в 2 раза (с 1 до 2) среднее число тестов и среднее время успешного тестирования уменьшаются на 25%, а при увеличении среднего числа фотонов в синхроимпульсе в 10 раз (с 1 до 10) различие составляет уже 35%.

Таблица 2

Результаты расчёта параметров этапа тестирования

\bar{n}_s	Среднее число фотонов в синхроимпульсе				
	1	2	3	4	5
$100p_{test1.2}$	63,21	86,47	95,02	98,17	99,33
$N_{test.2}$	5	3	2	2	1
$\bar{N}_{test.2}$	1,538	1,146	1,045	1,018	0,993
$\bar{T}_{test.2}$, мкс	301,01	224,38	204,54	199,21	194,44
\bar{n}_s	Среднее число фотонов в синхроимпульсе				
	6	7	8	9	10
$100p_{test1.2}$	99,75	99,91	99,97	99,99	100,00
$N_{test.2}$	1	1	1	1	1
$\bar{N}_{test.2}$	0,998	0,999	1,00	1,00	1,00
$\bar{T}_{test.2}$, мкс	195,27	195,58	195,69	195,74	195,75

Выводы. Получены аналитические выражения для расчёта временных и вероятностных характеристик этапов поиска и тестирования предложенного алгоритма обнаружения на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом, в том числе для расчёта допустимого числа кадров и тестов при обеспечении требуемых вероятностей успешного поиска и тестирования соответственно. Результаты расчётов подтверждают значительное снижение допустимого и среднего чисел кадров и тестов и, следовательно, среднего времени успешного поиска и тестирования при увеличении среднего числа фотонов в синхроимпульсе. Так, например, при заданных исходных данных допустимое число тестов, среднее число тестов и среднее время успешного тестирования снижаются в 5; 1,5; 1,6 раза соответственно при увеличении среднего числа фотонов в синхроимпульсе в 5 раз (с 1 до 5).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Румянцев К.Е. Системы квантового распределения ключа: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2011. – 264 с.
2. Румянцев К.Е. Квантовые технологии в телекоммуникационных системах: учебник. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. – 346 с.
3. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. Quantum cryptography // *Reviews of Modern Physics*. – 2002. – Vol. 74, No. 1. – P. 145-195.
4. Rumyantsev K.E., Pljonkin A.P. Single-photon Synchronization Mode of Quantum Key Distribution System // 2016 International Conference on Computational Techniques in Information and Communication Technologies (ICCTICT). – 2016. – P. 1-6.
5. Lindsey W.C. Synchronization Systems in Communication and Control. – Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1972.
6. Курочкин В.Л. и др. Экспериментальные исследования в области квантовой криптографии // *Фотоника*. – 2012. – Т. 5. – С. 54-66.
7. Rumyantsev K.E., Linenko P.D., Shakir H.H.-Sh. Evaluation of the Influence of the Dispersion Properties of a Fiber-Optic Line on the Efficiency of an Algorithm for Single-Photon Synchronization of Quantum Key Distribution System // *Conference Proceedings - Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2019*. – 2019. – P. 392-395.
8. Миронов Я.К., Миронова П.Д. Вероятность обнаружения сигнального окна в алгоритме поиска фотонного импульса с разбиением временного интервала на временные окна // VI Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности»: Сб. статей Всероссийской научно-технической конференции, 06-12 апреля 2020 г. – Таганрог, 2020. – С. 135-138.
9. Mironov Y.K., Rumyantsev K.E. Single-Photon Algorithm for Synchronizing the System of Quantum Key Distribution with Polling Sections of a Fiber-Optic Line // *Communications in Computer and Information Science*. – 2020. – Vol. 1206. – P. 87-97. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-4451-4_8.

10. Mironov Y.K., Mironova P.D., Rumyantsev K.E. Methodology for calculating the average time of entry into synchronism of stations of the system of quantum key distribution with sequential polling of fiber-optic line sections with decreasing length by the graphic-analytical method // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 224. – P. 1-9.
11. Mironov Y., Mironova P., Rumyantsev K. Characteristics of a two-stage synchronization algorithm in the system of quantum key distribution with dividing a fiber-optic line into sections with decreasing length // ACM International Conference Proceeding Series. – 2020. – Paper №3433596. – P. 1-5.
12. Миронов Я.К., Миронова П.Д., Румянцев К.Е. Вероятностные характеристики порогового алгоритма обнаружения синхросигналов в системе квантового распределения ключа на основе информации со смежной пары временных сегментов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 4 (214). – С. 221-229.
13. Румянцев К.Е., Миронова П.Д., Шакир Хайдер Хуссейн. Оценка влияния функциональных элементов на параметры системы квантового распределения ключа на основе протокола B92 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 4. – С. 63-77.
14. Румянцев К.Е. Синхронизация в системе квантового распределения ключа с автоматической компенсацией поляризационных искажений // Телекоммуникации. – 2017. – № 2. – С. 32-40.
15. Румянцев К.Е., Рудинский Е.А. Двухэтапный временной алгоритм синхронизации в системе квантового распределения ключа с автоматической компенсацией поляризационных искажений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 5 (190). – С. 75-89.
16. Румянцев К.Е., Плёнкин А.П. Синхронизация системы квантового распределения ключа при использовании фотонных импульсов для повышения защищённости // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 8. – С. 81-96.
17. Гальярди Р.М., Карп Ш. Оптическая связь. – М.: Связь, 1978. – 424 с.
18. Миронова П.Д. Алгоритм обнаружения синхросигнала в системе квантового распределения ключа на основе сравнения суммы отсчетов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем // Digital Era: Матер. I Всероссийской научно-практической конференции. – Грозный: Чеченский государственный университет, 2021. – С. 91-94. – DOI: 10.36684/38-2021-1-91-94.
19. Миронов Я.К., Миронова П.Д., Румянцев К.Е. Исследование характеристик алгоритма синхронизации системы квантового распределения ключа на основе сравнения числа отсчетов со смежной пары временных окон с пороговым уровнем // Фундаментальные проблемы информационной безопасности в условиях цифровой трансформации: Сб. докладов II Всероссийской научной конференции (с приглашением зарубежных ученых), Ставрополь, Россия Ноябрь 30, 2020. – Ставрополь: СКФУ, 2020. – С. 219-226.
20. Румянцев К.Е., Миронова П.Д. Вероятностные характеристики алгоритма обнаружения синхросигналов на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 3 (233). – С. 96-107.

REFERENCES

1. Rumyantsev K.E. Sistemy kvantovogo raspredeleniya klyucha: ucheb. posobie [Systems of quantum key distribution: a study guide]. Rostov-on-Donu: YuFU, 2011, 264 p.
2. Rumyantsev K.E. Kvantovye tekhnologii v telekommunikatsionnykh sistemakh: uchebnik [Quantum technologies in telecommunication systems: textbook]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2021, 346 p.
3. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. Quantum cryptography, *Reviews of Modern Physics*, 2002, Vol. 74, No. 1, pp. 145-195.
4. Rumyantsev K.E., Pljonkin A.P. Single-photon Synchronization Mode of Quantum Key Distribution System, *2016 International Conference on Computational Techniques in Information and Communication Technologies (ICCTICT)*, 2016, pp. 1-6.
5. Lindsey W.C. Synchronization Systems in Communication and Control. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1972.
6. Kurochkin V.L. i dr. Eksperimental'nye issledovaniya v oblasti kvantovoy kriptografii [Experimental research in the field of quantum cryptography], *Fotonika [Photonics]*, 2012, Vol. 5, pp. 54-66.
7. Rumyantsev K.E., Linenko P.D., Shakir H.H.-Sh. Evaluation of the Influence of the Dispersion Properties of a Fiber-Optic Line on the Efficiency of an Algorithm for Single-Photon Synchronization of Quantum Key Distribution System, *Conference Proceedings - Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2019*, 2019, pp. 392-395.
8. Mironov Ya.K., Mironova P.D. Veroyatnost' obnaruzheniya signal'nogo okna v algoritme poiska fotonnogo impul'sa s razbieniem vremennogo intervala na vremennye okna [The probability of detecting a signal window in the photon pulse search algorithm with a time interval split into time windows], *VI Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchennykh, aspirantov, magistrantov i studentov «Fundamental'nye i prikladnye aspekty komp'yuternykh tekhnologiy i*

- informatsionnoy bezopasnosti»: Sb. statey Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 06-12 aprelya 2020 g.* [VI All-Russian Scientific and Technical Conference of Young Scientists, postgraduates, undergraduates and students «Fundamental and applied aspects of computer technology and information security»: Collection of articles of the All-Russian Scientific and Technical Conference, 06-12 April 2020]. Taganrog, 2020, pp. 135-138.
9. Mironov Y.K., Rumyantsev K.E. Single-Photon Algorithm for Synchronizing the System of Quantum Key Distribution with Polling Sections of a Fiber-Optic Line, *Communications in Computer and Information Science*, 2020, Vol. 1206, pp. 87-97. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-4451-4_8.
 10. Mironov Y.K., Mironova P.D., Rumyantsev K.E. Methodology for calculating the average time of entry into synchronism of stations of the system of quantum key distribution with sequential polling of fiber-optic line sections with decreasing length by the graphic-analytical method, *E3S Web of Conferences*, 2020, Vol. 224, pp. 1-9.
 11. Mironov Y., Mironova P., Rumyantsev K. Characteristics of a two-stage synchronization algorithm in the system of quantum key distribution with dividing a fiber-optic line into sections with decreasing length, *ACM International Conference Proceeding Series*, 2020, Paper No. 3433596, pp. 1-5.
 12. Mironov Ya.K., Mironova P.D., Rumyantsev K.E. Veroyatnostnye kharakteristiki porogovogo algoritma obnaruzheniya sinkhroimpul'sov v sisteme kvantovogo raspredeleniya klyucha na osnove informatsii so smezhnoy pary vremennykh segmentov [Probabilistic Characteristics of a Threshold Sync Detection Algorithm in a Quantum Key Distribution System Based on Information from an Adjacent Pair of Time Segments], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 4 (214), pp. 221-229.
 13. Rumyantsev K.E., Mironova P.D., Shakir Khayder Khusseyn. Otsenka vliyaniya funktsional'nykh elementov na parametry sistemy kvantovogo raspredeleniya klyucha na osnove protokola B92 [Evaluation of the influence of functional elements on the parameters of the quantum key distribution system based on the B92 protocol], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 4, pp. 63-77.
 14. Rumyantsev K.E. Sinkhronizatsiya v sisteme kvantovogo raspredeleniya klyucha s avtomaticheskoy kompensatsiey polyarizatsionnykh iskazheniy [Synchronization in a quantum key distribution system with automatic compensation of polarization distortions], *Telekommunikatsii* [Telecommunications], 2017, No. 2, pp. 32-40.
 15. Rumyantsev K.E., Rudinskiy E.A. Dvukhetapnyy vremennyy algoritm sinkhronizatsii v sisteme kvantovogo raspredeleniya klyucha s avtomaticheskoy kompensatsiey polyarizatsionnykh iskazheniy, *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 5 (190), pp. 75-89.
 16. Rumyantsev K.E., Plenkin A.P. Sinkhronizatsiya sistemy kvantovogo raspredeleniya klyucha pri ispol'zovanii fotonnykh impul'sov dlya povysheniya zashchishchennosti [Synchronization of the system of quantum key distribution when using photon pulses to increase security], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 8, pp. 81-96.
 17. Gal'yardi R.M., Karp Sh. Opticheskaya svyaz' [Optical communication]. Moscow: Svyaz', 1978, 424 s.
 18. Mironova P.D. Algoritm obnaruzheniya sinkhrosignala v sisteme kvantovogo raspredeleniya klyucha na osnove sravneniya summy otschetov so smezhnoy pary segmentov s porogovym urovnem [An algorithm for detecting a sync signal in a quantum key distribution system based on comparing the sum of count from an adjacent pair of segments with a threshold level], *Digital Era: Mater. I Vserossiyskoy nauchno prakticheskoy konferentsii* [Digital Era: Materials of the I All-Russian scientific and practical conference]. Groznyy: Chechenskiy gosudarstvennyy universitet, 2021, pp. 91-94. DOI: 10.36684/38-2021-1-91-94.
 19. Mironov YA.K., Mironova P.D., Rumyantsev K.E. Issledovanie kharakteristik algoritma sinkhronizatsii sistemy kvantovogo raspredeleniya klyucha na osnove sravneniya chisla otschetov so smezhnoy pary vremennykh okon s porogovym urovnem [Investigation of the characteristics of the synchronization algorithm of the quantum key distribution system based on the comparison of the number of samples from an adjacent pair of time windows with a threshold level], *Fundamental'nye problemy informatsionnoy bezopasnosti v usloviyakh tsifrovoy transformatsii: Sb. dokladov II Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii (s priglasheniem zarubezhnykh uchenykh)*, Stavropol', Rossiya Noyabr' 30, 2020 [Collection of reports of the II All-Russian scientific conference (with the invitation of foreign scientists), Stavropol, Russia November 30, 2020]. Stavropol': SKFU, 2020, pp. 219-226.
 20. Rumyantsev K.E., Mironova P.D. Veroyatnostnye kharakteristiki algoritma obnaruzheniya sinkhrosignalov na osnove vybora smezhnoy pary segmentov s maksimal'nym summarnym otschetom [Probabilistic characteristics of the algorithm for detecting sync signals based on the selection of an adjacent pair of segments with the maximum total count], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 3 (233), pp. 96-107.

Статью рекомендовала к опубликованию к.т.н., доцент Л.А. Албогачиева.

Румянцев Константин Евгеньевич – Южный федеральный университет; e-mail: rke2004@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89281827209; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; д.т.н.; профессор, зав. кафедрой.

Миронов Яков Константинович – e-mail: tmiyap117@gmail.com; тел.: +78632184000, доб. 30004; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; к.т.н.; старший преподаватель.

Миронова Полина Демьяновна – e-mail: mironova.polina.dem@gmail.com; тел.: 89081924053; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; ассистент.

Rumyantsev Konstantin Yevgenievich – Southern Federal University; e-mail: rke2004@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79281827209; the Department of Information Security of Telecommunication Systems; dr. of eng. sc.; professor; head of department.

Mironov Yakov Konstantinovich – e-mail: tmiyap117@gmail.com; phone: +78632184000 (30004); the Department of Information Security of Telecommunication Systems; cand. of eng. sc.; senior lecturer.

Mironova Polina Demyanovna – e-mail: mironova.polina.dem@gmail.com; phone: +79081924053; the Department of Information Security of Telecommunication Systems; assistant.

УДК 519.143

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-126-137

А.О. Новиков, Э.И. Ватутин, С.И. Егоров, В.С. Титов

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ДАББАГЯНА-ВУ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ НЕЦИКЛИЧЕСКИХ ПАНДИАГОНАЛЬНЫХ ЛАТИНСКИХ КВАДРАТОВ

Рассматривается математическая модель и базирующийся на ней алгоритм Даббагяна-Ву, предназначенный для построения нециклических пандиагональных латинских квадратов. Показано, что из-за высокой вычислительной сложности и факта существования других разновидностей пандиагональных квадратов, применение классических алгоритмов, таких как полный перебор и циклических сдвигов, недостаточно для построения полного перечня пандиагональных латинских квадратов. Этим подтверждается цель работы – исследование и экспериментальная апробация математических моделей и алгоритмов, предназначенных для задачи построения за приемлемое время. Здесь производится исследование алгоритма, представленного Даббагяном В. и Ву. Т, который предназначен для построения пандиагональных латинских квадратов простых порядков p , определяемых выражением $p=6n+1$. Можно сказать, что он является модификацией алгоритма циклического построения. То есть, позволяет получить из исходного циклического квадрата пандиагональный нециклический. Преобразование выполняется путем циклических сдвигов в определенных ячейках в каждой строке исходного квадрата. Была разработана программная реализация алгоритма Даббагяна-Ву. Результат экспериментов подтвердил корректность предложенной Даббагяном В. и Ву. Т. методики построения. Таким образом, для порядка 13 удалось найти 72 уникальных квадрата. К тому же, проведена попытка построения для порядка, не являющегося нечетным простым числом, например 25. В данном случае удалось получить 4 корректных пандиагональных латинских квадрата. Путем дополнительных преобразований полученных наборов увеличить количество квадратов, так, для порядка 13 коллекция расширена до 1570, а для 25 – до 210. Исследование позволило углубленно ознакомиться с алгоритмом Даббагяна-Ву и сделать вывод о его особенностях – к достоинствам относится его относительно низкая вычислительная сложность, а к недостаткам – полноценная корректность построений только для нечетных простых порядков. Полученные наборы квадратов в дальнейшем будут задействованы для получения их числовых характеристик при помощи распределенных вычислений.

Пандиагональные латинские квадраты; нециклические латинские квадраты; циклический сдвиг; построение; алгоритм; математическая модель; вычислительная сложность.

A.O. Novikov, E.I. Vatutin, S.I. Egorov, V.S. Titov

RESEARCH OF THE DABBAGHIAN-WU ALGORITHM FOR CONSTRUCTING NON-CYCLIC PANDIAGONAL LATIN SQUARES

In this paper we consider a mathematical model and the Dabbaghian-Wu algorithm based on it, designed to construct non-cyclic pandiagonal Latin squares. It is shown that due to the high computational complexity and the fact of existence of other varieties of pandiagonal squares, the application of classical algorithms, such as brute force and cyclic shifts, is insufficient to construct a complete list of pandiagonal Latin squares. This

confirms the purpose of the work – the research and experimental approbation of mathematical models and algorithms for the task of construction in an acceptable time. We perform research of the algorithm presented by Dabbaghian and Wu, which is intended for constructing pandiagonal Latin squares of prime order p , defined by the expression $p=6n+1$. It is a modification of the cyclic construction algorithm and allows to obtain a pandiagonal non-cyclic square from the original cyclic square. The conversion is done by cyclic shifts in specific cells in each row of the original square. A software implementation of the Dabbaghian-Wu algorithm was developed. The results of the experiments confirmed the correctness of the construction methodology proposed by Dabbaghian and Wu. Thus, for order 13, 72 unique squares were found. In addition, an attempt was made to construct for an order that is not an odd prime number, for example 25. In this case, it was possible to obtain 4 correct pandiagonal Latin squares. By additional conversions of the resulting sets, increase the number of squares, so for order 13 the collection is expanded to 1570, and for 25 to 210. The research made it possible to research the Dabbaghian-Wu algorithm in depth and draw a conclusion about its features, the advantages include its relatively low computational complexity, and the disadvantages are the full correctness of the constructions only for odd prime orders. The resulting sets of squares will be used in the future to obtain their numerical characteristics using distributed computing.

Pandiagonal Latin squares; non-cyclic Latin squares; cyclic shift; construction; algorithm; mathematical model; computational complexity.

Введение. В комбинаторике довольно широко известна структура, называемая латинским квадратом [1, 2].

Одним из редких типов латинских квадратов, представляющих научный интерес, являются так называемые пандиагональные латинские квадраты (далее по тексту – ПДЛК, PDLs). Они определяются следующим образом: латинский квадрат порядка N является пандиагональным, если элементы каждой строки, каждого столбца, главной и побочной диагонали, параллельных им ломаных диагоналей образуют множества, равные \mathbb{Z}_N , где $\mathbb{Z}_N = \{0, \dots, N - 1\}$. Ломанная k -я диагональ, параллельная главной диагонали, определяется как множество элементов квадрата

$$\{D_k\} = x_{k, (k+i) \bmod N}, i \in \{0, \dots, N - 1\},$$

а побочная ломанная k -я диагональ, параллельная побочной диагонали (ломаная k -я антидиагональ), как

$$\{D_k\} = x_{k, (N-k+i) \bmod N}, i \in \{0, \dots, N - 1\},$$

где x – ячейка латинского квадрата. Иными словами, в ПДЛК все ломаные диагонали и антидиагонали являются трансверсалиями [1].

Известно, что ПДЛК существуют только для нечетных порядков, не кратных 3 [2].

Множество всех латинских квадратов заданного типа и порядка N , в том числе множество всех пандиагональных ЛК, генерируются при помощи алгоритма полного перебора, но за счет чрезмерно большой вычислительной сложности его применение на практике возможно только для порядков $N < 10$ с рядом алгоритмических особенностей и оптимизаций соответствующих параллельных и/или распределенных программных реализаций [3–6].

Это обусловлено тем, что далее с ростом размерности задачи происходит так называемый «комбинаторный взрыв», вычислительная сложность резко возрастает и построение ЛК для больших N данным методом попросту невозможно за приемлемое время.

Таким образом, задача исследования и разработки алгоритмов для построения ПДЛК больших порядков является актуальной.

Постановка задачи. Известно, все ПДЛК порядков $N \leq 11$ являются циклическими, чего нельзя сказать о порядках $N > 11$, поэтому для $N \leq 11$ генерация может быть выполнена при помощи алгоритма, базирующегося на циклических сдвигах строк формируемого квадрата и обладающего полиномиальной временной асимптотикой. Данный алгоритм описывается следующим образом: пусть K – циклический латинский квадрат порядка N , где значение каждой его ячейки выражается как

$$K_{i,j} = [\lambda i + j] \bmod N,$$

где $i, j \in \{0, \dots, N - 1\}$ – ячейки латинского квадрата, λ – величина циклического сдвига [7].

К. Вик доказал, что полученный таким методом квадрат является пандиагональным в том случае, когда величина сдвига λ равна $2 \leq \lambda \leq N - 2$ [3, 4] (для $\lambda = 0$ получаемый ЛК является некорректным ввиду того, что все его строки совпадают, для $\lambda = 1$ и $\lambda = N - 1$ получаемые квадраты являются циклическими ЛК, но не ДЛК и не ПДЛК ввиду наличия дублирующихся значений на главной и побочной диагонали соответственно).

По формуле видно, что асимптотическая временная сложность данного алгоритма определяется как $t \approx O(N^2(N - 3)) \approx O(N^3)$.

На рис. 1 представлен пример латинского квадрата порядка 11, который является циклическим и пандиагональным.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	3	4	5	6	7	8	9	10	0	1
4	5	6	7	8	9	10	0	1	2	3
6	7	8	9	10	0	1	2	3	4	5
8	9	10	0	1	2	3	4	5	6	7
10	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	0
3	4	5	6	7	8	9	10	0	1	2
5	6	7	8	9	10	0	1	2	3	4
7	8	9	10	0	1	2	3	4	5	6
9	10	0	1	2	3	4	5	6	7	8

Рис. 1. Пример циклического пандиагонального латинского квадрата порядка 11 для значения $\lambda=2$

Из рисунка видно, что строки квадрата получены при помощи циклического сдвига предыдущей строки на величину λ , а все столбцы – циклическим сдвигом предыдущего столбца на некоторую величину λ' , ввиду чего в некоторых источниках подобные квадраты называются дважды циклическими. Между значениями величин λ и λ' для заданного порядка квадрата N имеется взаимно однозначное соответствие.

Для порядков $N > 11$ помимо циклических существуют также другие разновидности ПДЛК с определенными свойствами, например полуциклические и нециклические квадраты [8].

Полуциклический латинский квадрат определяется следующим образом: либо все строки i являются циклическими перестановками первой строки на некоторое значение λ_i , либо столбцы j являются циклическими перестановками первого столбца на некоторое значение λ'_j , но не одновременно [6].

В нециклическом латинском квадрате ни его строки, ни его столбцы не являются циклическими сдвигами первой строки и столбца соответственно.

Из вышеописанного можно сделать вывод о том, что применение данного алгоритма также недостаточно для построения полного перечня ПДЛК порядков $N > 11$.

Задачей исследования методик генерации ПДЛК занимались такие ученые как А.О.Л. Аткин, Л. Хэй, Р.Г. Ларсон, Дж. Белл, Б. Стивенс, В. Даббаган, Т. Ву, А. Хедаят, А. Стоффель, К. Вик [8–14].

Алгоритм формирования всех ПДЛК с приемлемой временной сложностью неизвестен, ввиду чего на практике известен ряд частных решений данной задачи, сводящихся к получению ПДЛК некоторых типов [15, 16].

Метод решения. Одно из решений данной проблемы было найдено В. Даббаганом и Т. Ву – ими была предложена математическая модель и алгоритм построения нециклических ПДЛК простых порядков $p = 6t + 1$, где t – целое положительное число [11, 14]. Данный алгоритм опирается на теорию модульной арифметики и, по сути, представляет собой модификацию метода построения при помощи циклических сдвигов [7].

Алгоритм Даббагыяна-Ву позволяет построить нециклический ПДЛК порядка p из исходного циклического ПДЛК и состоит из нескольких этапов [14].

1. Сперва необходимо найти неупорядоченные пары целых чисел a и b , $a, b \in \{1, \dots, p-1\}$, $a < b$, такие, что выполняется следующее сравнение по модулю:

$$a^2 + b^2 \equiv ab \pmod{p}.$$

2. Для каждой найденной пары чисел a и b необходимо найти значение $c = a - b$ и такое l , что

$$(a + b)l = a^2 \pmod{p}.$$

3. Для каждой пары a и b найти 6 пар целых чисел λ и u таких, что

$$(\lambda, u) \in \left\{ \left(\frac{b-a}{a+b}, -\frac{1}{3} \right), \left(\frac{a-b}{a+b}, \frac{1}{3} \right), \left(\frac{a+b}{b-a}, 1 \right), \right. \\ \left. \left(\frac{a+b}{a-b}, -1 \right), \left(-\frac{b}{a}, 1 \right), \left(\frac{b}{a}, -1 \right) \right\} \pmod{p}.$$

Говоря иначе, следует решить 6 пар сравнений по модулю:

$$Lx \equiv R \pmod{p}.$$

Перепишем задачу согласно данной формуле:

$$(\lambda, u) \in \left\{ \begin{array}{l} ((a+b)\lambda \equiv b-a, 3u \equiv -1), \\ ((a+b)\lambda \equiv a-b, 3u \equiv 1), \\ ((b-a)\lambda \equiv a+b, 1u \equiv 1), \\ ((a-b)\lambda \equiv a+b, 1u \equiv -1), \\ (a\lambda \equiv -b, 1u \equiv 1), \\ (a\lambda \equiv b, 1u \equiv -1) \end{array} \right\} \pmod{p}.$$

4. Построить исходный циклический ПДЛК K порядка p согласно выражению для каждой величины сдвига λ из полученного набора.

5. В каждой i -ой строке, $i \in \{0, \dots, p-1\}$, циклического ПДЛК необходимо поменять местами значения в определенных ячейках по следующим правилам:

$$temp = K[i][iu];$$

$$1. K[i][iu] = K[i][iu + b];$$

$$2. K[i][iu + b] = K[i][iu + a];$$

$$3. K[i][iu + a] = temp;$$

$$temp = K[i][iu + l];$$

$$4. K[i][iu + l] = K[i][iu + c + l];$$

$$5. K[i][iu + c + l] = K[i][iu + b + l]$$

$$6. K[i][iu + b + l] = temp.$$

При выполнении вышеописанных этапов формируется корректный нециклический ПДЛК [14, 15].

Рассмотрим данный алгоритм на примере. Возьмем порядок построения $p = 13 = 2 \cdot 6 + 1$.

Сперва выполняется поиск пар значений (a, b) , удовлетворяющих выражению. Для порядка 13 полученный набор представлен ниже:

$$\left\{ \begin{array}{l} (1, 4), (1, 10), (2, 7), (2, 8), (3, 4), \\ (3, 12), (5, 7), (5, 11), (6, 8), \\ (6, 11), (9, 10), (9, 12) \end{array} \right\}.$$

Для дальнейших преобразований в качестве примера используется $(a, b) = (5, 7)$. В данном случае $l = 1$, $c = b - a = 7 - 5 = 2$.

Далее выполняется поиск значений (λ, u) согласно выражениям. Паре $(a, b) = (5, 7)$ соответствует следующий набор (λ, u) :

$$\left\{ \begin{array}{l} (11, 4), (2, 9), (6, 1), \\ (7, 12), (9, 1), (4, 12) \end{array} \right\}$$

Следующим шагом выполняется построение исходного циклического квадрата по выражению. Для примера $(\lambda, u) = (7, 12)$. Полученный таким образом циклический квадрат представлен на рис. 2.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7	8	9	10	11	12	0	1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	0
8	9	10	11	12	0	1	2	3	4	5	6	7
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	0	1
9	10	11	12	0	1	2	3	4	5	6	7	8
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	0	1	2
10	11	12	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	5	6	7	8	9	10	11	12	0	1	2	3
11	12	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	6	7	8	9	10	11	12	0	1	2	3	4
12	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	7	8	9	10	11	12	0	1	2	3	4	5

Рис. 2. Циклический ПДЛК порядка $N=13$ и величиной сдвига $\lambda=7$

Теперь необходимо выполнить преобразования каждой i -ой строке, $i \in \{0, \dots, p-1\}$, циклического ПДЛК по выражениям.

Для строки $i = 0$.

$$temp = K_{0,0} = 0;$$

$$1. K_{0,0} = K_{0,7} = 7;$$

$$2. K_{0,7} = K_{0,5} = 5;$$

$$3. K_{0,5} = temp = 0;$$

$$temp = K_{0,1} = 1;$$

$$4. K_{0,1} = K_{0,3} = 3;$$

$$5. K_{0,3} = K_{0,8} = 8;$$

$$6. K_{0,8} = temp = 1;$$

Аналогичные преобразования выполняются и для остальных строк квадрата. Например, для второй строки ($i = 1$) получим:

$$temp = K_{1,12} = 6;$$

$$1. K_{1,12} = K_{1,6} = 0;$$

$$2. K_{1,6} = K_{1,4} = 11;$$

$$3. K_{1,4} = temp = 6;$$

$$temp = K_{1,0} = 7;$$

$$4. K_{1,0} = K_{1,2} = 9;$$

$$5. K_{1,2} = K_{1,7} = 1;$$

$$6. K_{1,7} = temp = 7;$$

Остальные строки квадрата обрабатываются таким же образом. В результате преобразований построен нециклический ПДЛК, который представлен ниже (рис. 3).

7	3	2	8	4	0	6	5	1	9	10	11	12
9	8	1	10	6	12	11	7	2	3	4	5	0
1	7	3	12	5	4	0	8	9	10	11	6	2
0	9	5	11	10	6	1	2	3	4	12	8	7
2	11	4	3	12	7	8	9	10	5	1	0	6
4	10	9	5	0	1	2	3	11	7	6	12	8
3	2	11	6	7	8	9	4	0	12	5	1	10
8	4	12	0	1	2	10	6	5	11	7	3	9
10	5	6	7	8	3	12	11	4	0	9	2	1
11	12	0	1	9	5	4	10	6	2	8	7	3
5	6	7	2	11	10	3	12	8	1	0	9	4
12	0	8	4	3	9	5	1	7	6	2	10	11
6	1	10	9	2	11	7	0	12	8	3	4	5

Рис. 3. Нециклический ПДЛК, полученный при помощи преобразований

Первая часть преобразований строк фактически выполняет циклическое перемещение вправо записей ячеек, которые определяются уравнениями замен. Соответственно, вторая часть отвечает за циклический сдвиг влево определенных ячеек в квадрате. То есть, циклически перемещаются только значения в указанных индексах, при этом остальные ячейки строки квадрата не изменяются.

Процесс подробно изображен на рис. 4.

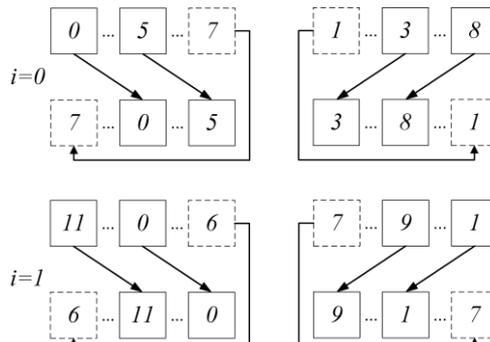


Рис. 4. Преобразования в строках квадрата в виде циклических сдвигов определенных ячеек (на примере первой и второй строки квадрата)

Данные преобразования в строках представлены на рис. 5 ниже. Циклическим сдвигам влево и вправо соответствует определенный рисунок штриховки в ячейках.

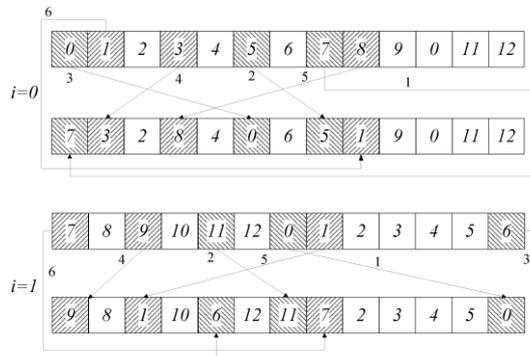


Рис. 5. Циклические сдвиги в строках латинского квадрата

После выполнения смещения ячеек изменяются значения в определенных столбцах квадрата, при этом одно из них отсутствует, а другое дважды повторяется за счет сдвигов. К тому же, аналогичное явление возникает и на соответствующих ломаных диагоналях.

В столбцах данные нарушения исправляются при помощи циклического сдвига влево ячеек в тех строках, где имеется несоответствие. После выполнения в первой строке циклического сдвига вправо одно число повторяется дважды, а другое отсутствует, как видно, это относится и к столбцам, и к ломаным диагоналям. При сдвигах значений ячеек влево в последующих строках, где обнаружено удвоение, устраняется данное противоречие. К примеру, после замен в строке $i = 1$ исчезает цифра 7, дважды повторяющаяся в столбце $j = 0$ [14].

По ломаным диагоналям нарушение исправляется тем же видом сдвига, которым оно и вызвано. Например, удвоения на ломаных главных и побочных устраняются при совершении сдвигов вправо в строках, где они были зафиксированы.

В свою очередь, выполнение сдвигов далее также вызывает такие же нарушения в столбцах и ломаных диагоналях, которые, по аналогии, исправляются новыми сдвигами. То есть, в процессе преобразований в строках происходит пошаговое исправление ошибок, вызванных предыдущими смещениями. После выполнения смещений во всех строках исходного квадрата будет построен нециклический ПДЛК. Поэтапная карта преобразований при помощи сдвигов показана на рис 6 и 7.

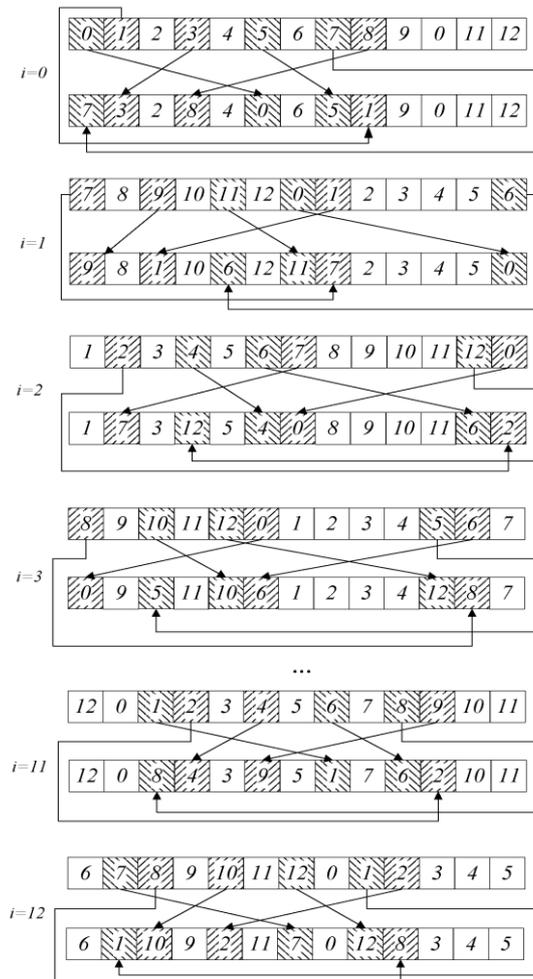


Рис. 6. Карта пошаговых преобразований исходного циклического квадрата

7	3	2	8	4	0	6	5	1	9	10	11	12
9	8	1	10	6	12	11	7	2	3	4	5	0
1	7	3	12	5	4	0	8	9	10	11	6	2
0	9	5	11	10	6	1	2	3	4	12	8	7
2	11	4	3	12	7	8	9	10	5	1	0	6
4	10	9	5	0	1	2	3	11	7	6	12	8
3	2	11	6	7	8	9	4	0	12	5	1	10
8	4	12	0	1	2	10	6	5	11	7	3	9
10	5	6	7	8	3	12	11	4	0	9	2	1
11	12	0	1	9	5	4	10	6	2	8	7	3
5	6	7	2	11	10	3	12	8	1	0	9	4
12	0	8	4	3	9	5	1	7	6	2	10	11
6	1	10	9	2	11	7	0	12	8	3	4	5

Рис. 7. Итоговая карта преобразований для анализируемого ПДЛК

Следует отметить, что построение квадрата единственным образом определяется набором пар параметров (a, b) и соответствующим каждой такой паре значений набором (λ, u) , то есть, для каждой связки этих переменных ПДЛК является уникальным [14].

Несложно показать, что зависимость количества M генерируемых алгоритмом нециклических ПДЛК от их порядка p определяется следующим образом:

$$M = 6(p - 1).$$

Например, для порядка 13 можно построить 72 уникальных ПДЛК.

Вычислительную сложность алгоритма Даббагяна-Ву можно представить так:

$$t \approx O(6 + (p - 1)^2 + (p - 1) \cdot 6 \cdot p^2 \cdot (6p)) \approx O(p^5).$$

Рассмотрим каждый элемент выражения:

6 – количество параметров u , которые достаточно вычислить единожды, их значения зависят только от порядка p ;

$(p - 1)^2$ – подбор пар параметров a, b и соответствующих им параметрам c, l ;

$(p - 1)$ – для построения ПДЛК берется каждая из подобранных пар a, b ;

6 – для пары a, b подбирается 6 значений величин сдвига λ ;

p^2 – для каждой величины сдвига λ строится исходный циклический латинский квадрат;

$(6p)$ – для каждого исходного циклического квадрата во всех строках выполняется цепочка преобразований.

При работе алгоритма затраты памяти, зависящие от размерности задачи, связаны лишь с хранением формируемого квадрата и составляют величину $t \approx O(p^2)$.

Результаты и обсуждение. В ходе исследования выполнена программная реализация вышеописанного алгоритма. Для порядка $p=13$ удалось найти 72 нециклических ПДЛК, для $p=19$ – 108, что соответствует выражению (10).

Для нечетных порядков, не являющихся простыми и не удовлетворяющих условию $p = 6t + 1$ также возможно построение нециклических ПДЛК. Однако часть результатов является некорректной, другая часть удовлетворяет условиям пандиагональности и нециклическости. На рис. 8 и 9 показаны примеры построений.

Для порядка 25 было найдено 4 ПДЛК, которые удовлетворяют условиям.

Была проведена попытка построения ПДЛК других нечетных порядков, определяемых как $p=2k+1$. Результат, показывающий количество верных построений в зависимости от порядка представлен ниже в виде числового ряда:

$$\{1, 0, 0, 24, 0, 72, 0, 0, 108, 0, 0, 4, 0, 0, \dots\}$$

Ход расширения коллекции ПДЛК порядка 13 путем описанных преобразований можно представить таким образом:

$$72 \rightarrow 264 \rightarrow 274 \rightarrow 1458 \rightarrow 1554 \rightarrow 1570.$$

Аналогичные действия были проведены для порядков 19 и 25. Следует указать, что для порядка $p=25$ не было проведено внесение полуматричных латинских квадратов ввиду сложности их построения для данного p .

Расширение коллекции ПДЛК порядка 19:

$$108 \rightarrow 546 \rightarrow 262 \rightarrow 172892 \rightarrow 173148 \rightarrow 173600.$$

Для порядка 25:

$$4 \rightarrow 16 \rightarrow 26 \rightarrow 210.$$

Данные преобразования позволили найти нижние оценки количества ПДЛК в числовой последовательности OEIS A338620:

$$\begin{aligned} A(13) &\geq 1570; \\ A(19) &\geq 173600; \\ A(25) &\geq 210. \end{aligned}$$

Найденные нижние оценки количества ПДЛК позволяют оценить масштабы и эффективность применения исследуемого алгоритма Даббагяна-Ву и представленных выше преобразований полученных коллекций. Описанные методы могут быть использованы для поиска новых решений на больших порядках.

Анализ результатов указывает на потенциал для дальнейших исследований, направленных на более точное определение общего количества ПДЛК и исследование их свойств.

Выводы. Таким образом, в статье была проведена апробация алгоритма Даббагяна-Ву для построения нециклических пандиагональных латинских квадратов, разработанная программная реализация и экспериментальные исследования с ее использованием подтвердили корректность рассмотренных выше математических построений.

Стоит отметить, что к достоинствам алгоритма Даббагяна-Ву можно отнести его относительно низкую вычислительную сложность, а к недостаткам – полноценную корректность построений только для нечетных простых порядков, удовлетворяющих выражению $p = 6m + 1$, где m – целое положительное число.

В перспективе планируется дальнейший анализ пандиагональных латинских квадратов, расчет их числовых характеристик при помощи распределенных вычислительных систем на базе грид-технологий, исследование других математических моделей, методов и алгоритмов для их построения [18–20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Colbourn C.J., Dinitz J.H. Handbook of Combinatorial Designs. – Second ed. – Chapman & Hall/CRC, 2006. – 1016 p.
2. Keedwell A.D., Dénes J. Latin Squares and their Applications. – Elsevier, 2015. – 438 p.
3. Ватутин Э.И. О перечислении циклических латинских квадратов и расчете значения функции Эйлера с их использованием // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. – 2020. – Т. 4, № 2. – С. 40-48.
4. Vatutin E.I., Kochemazov S.E., Zaikin O.S. Applying volunteer and parallel computing for enumerating diagonal Latin squares of order 9 // Proc. of The Eleventh International Conference on Parallel Computational Technologies, Vol. 753 of Communications in Computer and Information Science. – Springer, 2017. – P. 114-129.
5. Kochemazov S., Zaikin O., Vatutin E., Belyshev A. Enumerating diagonal latin squares of order up to 9 // Journal of Integer Sequences. – 2020. – Vol. 23, No. 1. – P. 2012.
6. Ватутин Э.И., Бельшев А.Д., Никитина Н.Н., Манзюк М.О. Использование X-образных диагональных заполнений и ESODLS CMS схем для перечисления главных классов диагональных латинских квадратов // Телекоммуникации. – 2023. – № 1. – С. 2-16.
7. Ватутин Э.И. О подсчете главных классов циклических диагональных и пандиагональных латинских квадратов // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов и обработки изображений. – 2021. – С. 77-79.

8. Bell J., Stevens B. Constructing orthogonal pandiagonal Latin squares and panmagic squares from modular n-queens solutions // *Journal of Combinatorial Designs*. – 2007. – No. 15 (3). – P. 221-234.
9. Hedayat A. A complete solution to the existence and nonexistence of Knut Vik designs and orthogonal Knut Vik designs // *Journal of Combinatorial Theory, Series A*. – 1977. – No. 22 (3). – P. 331-337.
10. Atkin A.O.L., Hay L., Larson R.G. Enumeration and construction of pandiagonal Latin squares of prime order // *Computers & Mathematics with Applications*. – 1983. – No. 9 (2). – P. 267-292.
11. Vik K. Bedømmelse av feilene på forsøksfelter med og uten målestokk. – 1924.
12. Stoffel A. Totally diagonal Latin squares // *Stud Cerc Mat*. – 1976. – Vol. 28. – P. 113-119.
13. Chang G.J., Hwang F.K. Diagonal and Pandiagonal Tournament Latin Squares // *European Journal of Combinatorics*. – 1985. – Vol. 6, No. 2. – P. 149-155.
14. Dabbagian V., Wu T. Constructing non-cyclic pandiagonal Latin squares of prime orders // *Journal of Discrete Algorithms*. – 2015. – No. 30. – P. 70-77.
15. Ватутин Э.И. Специальные виды диагональных латинских квадратов // *Облачные и распределенные вычислительные системы в электронном управлении ОРВСЭУ - 2022 в рамках Национального суперкомпьютерного форума (НСКФ - 2022)*. – 2022. – С. 9-18.
16. Vatutin E., Nikitina N., Belyshev A., Manzyuk M. On polynomial reduction of problems based on diagonal Latin squares to the exact cover problem // *CEUR Workshop*. – 2020. – P. 289-297.
17. Vatutin E., Belyshev A., Manzyuk M., Nikitina N. Evaluation of Efficiency of Using Simple Transformations When Searching for Orthogonal Diagonal Latin Squares of Order 10 // *Communications in Computer and Information Science*. – 2020. – Vol. 1304. – P. 127-146.
18. Альбертьян А.М., Курочкин И.И., Ватутин Э.И. Использование гетерогенных вычислительных комплексов в грид-системах из персональных компьютеров // *XIV Всероссийская мультимедийная конференция по проблемам управления МКПУ-2021*. – 2021. – С. 90-93.
19. Никитина Н.Н., Ватутин Э.И., Манзюк М.О. [и др.]. Показатели и технологическая основа проектов распределённых вычислений Rakesearch и Sidock@home // *Облачные и распределенные вычислительные системы в электронном управлении ОРВСЭУ - 2022 в рамках Национального суперкомпьютерного форума (НСКФ - 2022)*. – 2022. – С. 38-46.
20. Manzyuk M., Nikitina N., Vatutin E. Start-up and the Results of the Volunteer Computing Project RakeSearch // *Communications in Computer and Information Science*. – 2019. – Vol. 1129. – P. 725-734.

REFERENCES

1. Colbourn C.J., Dinitz J.H. *Handbook of Combinatorial Designs*. Second ed. Chapman & Hall/CRC, 2006, 1016 p.
2. Keedwell A.D., Dénes J. *Latin Squares and their Applications*. Elsevier, 2015, 438 p.
3. Vatutin E.I. O perechislenii tsiklicheskikh latinskikh kvadratov i raschete znacheniya funktsii Eylera s ikh ispol'zovaniem [On enumerating cyclic latin squares and calculating the value of the Euler function using them], *Vysokoproizvoditel'nye vychislitel'nye sistemy i tekhnologii* [High-performance computing systems and technologies], 2020, Vol. 4, No. 2, pp. 40-48.
4. Vatutin E.I., Kochemazov S.E., Zaikin O.S. Applying volunteer and parallel computing for enumerating diagonal Latin squares of order 9, *Proc. of The Eleventh International Conference on Parallel Computational Technologies, Vol. 753 of Communications in Computer and Information Science*. Springer, 2017, pp. 114-129.
5. Kochemazov S., Zaikin O., Vatutin E., Belyshev A. Enumerating diagonal latin squares of order up to 9, *Journal of Integer Sequences*, 2020, Vol. 23, No. 1, pp. 2012.
6. Vatutin E.I., Belyshev A.D., Nikitina N.N., Manzyuk M.O. Ispol'zovanie X-obraznykh diagonal'nykh zapolneniy i ESODLS CMS skhem dlya perechisleniya glavnykh klassov diagonal'nykh latinskikh kvadratov [Use of X-based diagonal fillings and ESODLS CMS schemes for enumeration of main classes of diagonal Latin squares], *Telekommunikatsii* [Telecommunications], 2023, No. 1, pp. 2-16.
7. Vatutin E.I. O podschete glavnykh klassov tsiklicheskikh diagonal'nykh i pandiagonal'nykh latinskikh kvadratov [On the calculation of the main classes of cyclic diagonal and pandiagonal Latin squares], *Optiko-elektronnye pribory i ustroystva v sistemakh raspoznavaniya obrazov i obrabotki izobrazheniy* [Optical-electronic instruments and devices in pattern recognition and image processing systems], 2021, pp. 77-79.
8. Bell J., Stevens B. Constructing orthogonal pandiagonal Latin squares and panmagic squares from modular n-queens solutions, *Journal of Combinatorial Designs*, 2007, No. 15 (3), pp. 221-234.
9. Hedayat A. A complete solution to the existence and nonexistence of Knut Vik designs and orthogonal Knut Vik designs, *Journal of Combinatorial Theory, Series A*, 1977, No. 22 (3), pp. 331-337.
10. Atkin A.O.L., Hay L., Larson R.G. Enumeration and construction of pandiagonal Latin squares of prime order, *Computers & Mathematics with Applications*, 1983, No. 9 (2), pp. 267-292.

11. *Vik K.* Bedømmelse av feilene på forsøksfelter med og uten målestokk. – 1924.
12. *Stoffel A.* Totally diagonal Latin squares, *Stud Cerc Mat.*, 1976, Vol. 28, pp. 113-119.
13. *Chang G.J., Hwang F.K.* Diagonal and Pandiagonal Tournament Latin Squares, *European Journal of Combinatorics*, 1985, Vol. 6, No. 2, pp. 149-155.
14. *Dabbagian V., Wu T.* Constructing non-cyclic pandiagonal Latin squares of prime orders, *Journal of Discrete Algorithms*, 2015, No. 30, pp. 70-77.
15. *Vatutin E.I.* Spetsial'nye vidy diagonal'nykh latinskikh kvadratov [Special types of diagonal Latin squares], *Oblachnye i raspredelennye vychislitel'nye sistemy v elektronnom upravlenii ORVSEU - 2022 v ramkakh Natsional'nogo superkomp'yuternogo foruma (NSKF – 2022)* [Cloud and distributed computing systems in the electronic management of ORVSEU - 2022 within the framework of the National Supercomputing Forum (NSCF - 2022)], 2022, pp. 9-18.
16. *Vatutin E., Nikitina N., Belyshev A., Manzyuk M.* On polynomial reduction of problems based on diagonal Latin squares to the exact cover problem, *CEUR Workshop*, 2020, pp. 289-297.
17. *Vatutin E., Belyshev A., Manzyuk M., Nikitina N.* Evaluation of Efficiency of Using Simple Transformations When Searching for Orthogonal Diagonal Latin Squares of Order 10, *Communications in Computer and Information Science*, 2020, Vol. 1304, pp. 127-146.
18. *Al'bert'yan A.M., Kurochkin I.I., Vatutin E.I.* Ispol'zovanie geterogennykh vychislitel'nykh kompleksov v grid-sistemakh iz personal'nykh komp'yuteroov [The use of heterogeneous computing complexes in grid systems of personal computers], *XIV Vserossiyskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya MKPU-2021* [XIV All-Russian Multiconference on Control Problems MKPU-2021], 2021, pp. 90-93.
19. *Nikitina N.N., Vatutin E.I., Manzyuk M.O. [i dr.]* Pokazateli i tekhnologicheskaya osnova proektov raspredelennykh vychisleniy Rakesearch i Sidock@home [Metrics and technological basis of distributed computing projects Rakesearch and Sidock@home], *Oblachnye i raspredelennye vychislitel'nye sistemy v elektronnom upravlenii ORVSEU - 2022 v ramkakh Natsional'nogo superkomp'yuternogo foruma (NSKF - 2022)* [Cloud and distributed computing systems in the electronic management of ORVSEU - 2022 within the framework of the National Supercomputing Forum (NSCF - 2022)], 2022, pp. 38-46.
20. *Manzyuk M., Nikitina N., Vatutin E.* Start-up and the Results of the Volunteer Computing Project RakeSearch, *Communications in Computer and Information Science*, 2019, Vol. 1129, pp. 725-734.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.А. Кравченко.

Новиков Александр Олегович – Юго-Западный государственный университет; e-mail: alexnov4616@gmail.com; г. Курск, Россия; кафедра вычислительной техники; магистрант.

Ватутин Эдуард Игоревич – e-mail: evatutin@rambler.ru; кафедра вычислительной техники; д.т.н.; профессор.

Егоров Сергей Иванович – e-mail: sie58@mail.ru; кафедра вычислительной техники; д.т.н.; профессор.

Титов Виталий Семенович – e-mail: vt.swsu@yandex.ru; кафедра вычислительной техники; д.т.н.; профессор.

Novikov Aleksandr Olegovich – South-West State University; e-mail: alexnov4616@gmail.com; Kursk, Russia; the Department of Computer Science; master student.

Vatutin Eduard Igorevich – e-mail: evatutin@rambler.ru; the Department of Computer Science; dr. of eng. sc.; professor.

Egorov Sergei Ivanovich – e-mail: sie58@mail.ru; the Department of Computer Science; dr. of eng. sc.; professor.

Titov Vitalii Semenovich – e-mail: vt.swsu@yandex.ru; the Department of Computer Science; dr. of eng. sc.; professor.

С. Сингх, А.В. Прибыльский

АЛГОРИТМ КЛАССИФИКАЦИИ ПОЖАРООПАСНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Современные технологические требования и развивающаяся городская инфраструктура ставят задачу разработки методов распознавания и классификации пожароопасных ситуаций. Быстрое и эффективное распознавание начальных признаков возгорания становится жизненно важным аспектом обеспечения безопасности людей, а также материальных ценностей. В связи с этим разрабатываются, реализуются, тестируются и внедряются системы, способные автоматически распознавать и классифицировать пожароопасные ситуации. Классификация пожароопасных ситуаций позволяет определить степень опасности обнаруженных отклонений, что способствует к принятию более эффективных решений по предотвращению последствий пожаров и их признаков таких как, однократное кратковременное повышение температуры и уровня задымленности которое может указывать на выход из строя электрических компонентов, расположенных возле датчиков. Алгоритм классификации пожароопасных ситуаций разработан для комплекса взаимосвязанных датчиков, который в свою очередь, за счет своей структуры, позволяет обнаруживать даже малейший признака пожара. В рамках данного исследования приводится алгоритм классификации пожароопасных ситуаций на основе нейросетевых технологий. Приведено описание существующих классов пожароопасных ситуаций, а также критерии, по которым размечались данные по указанным классам. Проведено моделирование алгоритма на обучающей и тестовой выборках с приведением используемых параметров точности, формулой их расчетов, результатами классификации пожароопасных ситуаций. Проведено исследование влияния шага отсчета в выборке базы данных на параметры точности и время обучения нейронной сети. Разработанный алгоритм реализован на языке программирования Python в IDE PyCharm. Датасет для обучения и тестирования получены из реальных источников, содержащих информацию об обнаруженных пожароопасных ситуациях в метрополитенах, в которых установлен комплекс взаимосвязанных датчиков. Результаты моделирования алгоритма показали, что предложенный алгоритм обладает высокой точностью для предиктивной классификации пожароопасных ситуаций на реальных объектах.

Пожарный датчик; Python; параметры точности; нейронные сети; классификация; моделирование; разметка данных.

S. Singh, A.V. Pribylskiy

ALGORITHM FOR CLASSIFICATION OF FIRE HAZARDOUS SITUATIONS BASED ON NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES

Modern technological requirements and developing urban infrastructure pose the task of developing methods for recognizing and classifying fire hazardous situations. Quickly and effectively recognizing the initial signs of a fire becomes a vital aspect of ensuring the safety of people as well as property. In this regard, systems are developed, implemented, tested and implemented that can automatically recognize and classify fire hazardous situations. Classification of fire hazardous situations allows you to determine the degree of danger of detected deviations, which contributes to making more effective decisions to prevent the consequences of fires and their signs, such as a one-time short-term increase in temperature and smoke level, which may indicate failure of electrical components located near the sensors. The algorithm for classifying fire hazardous situations is developed for a complex of interconnected sensors, which in turn, due to its structure, allows you to detect even the slightest sign of fire. Within the framework of this study, an algorithm for classifying fire hazardous situations based on neural network technologies is presented. A description of existing classes of fire hazardous situations is provided, as well as the criteria by which data for these classes were marked. The algorithm was modeled on training and test samples, presenting the accuracy parameters used, the formula for their calculations, and the results of classifying fire hazardous situations. A study was carried out of the influence of the sample step in the database sample on the accuracy parameters and training time of the neural network. The developed algorithm is implemented in the Python programming language in the PyCharm IDE. The dataset for training and testing was obtained from real sources containing information about detected fire hazardous situations in sub-

ways in which a complex of interconnected sensors is installed. The results of modeling the algorithm showed that the proposed algorithm has high accuracy for predictive classification of fire hazardous situations in real objects.

Fire sensor; simulink; detection signal; standard deviation; activation function; mathematical modeling.

Введение. Современные технологические объекты такие как метрополитен или любое высокотехнологическое предприятие представляют собой совокупность технических систем различной сложности с высокими требованиями по обеспечению пожарной безопасности. Если раньше достаточно было обнаружить сам факт наличия пожара или его признаки в отслеживаемой области, то на сегодняшний день все чаще ставится задача, не только детектирование пожароопасной ситуации, но и её классификации. Текущие системы для классификации возникших отклонений используют операторов-экспертов способных, на основании собственного опыта определить класс ситуации. Поэтому в настоящий момент актуализируются задачи автоматизации процесса обнаружения и классификации аномалии пожароопасных ситуаций, с целью минимизации субъективного человеческого фактора внутри системы, тем самым ускорить и повысить эффективность принятия управленческого решения в случае возникновения нештатных ситуаций.

Решение этой задачи предлагается осуществить с помощью интеллектуальной информационной системы, которая способна осуществлять поддержку принятия решения на основе предиктивного анализа информации за короткий период времени и тем самым минимизируя влияние человеческого фактора. Интеллектуальные информационные системы используют различные методы и алгоритмы решения поставленных перед ними целей, среди этих методов решения все больше набирают популярность методы использующие нейронные сети. Ввиду своей идеи, последние имитируют нейронную систему человека, функцией памяти, что позволяет реализовать экспертное мышление, при наличии размеченной обучающей базы данных. В контексте классификации пожароопасных ситуаций, для получения корректных результатов работы нейронной сети, целесообразно при разметке обучающей базы данных использовать экспертное знание, таким образом классифицируя не только обнаруженные пожароопасные ситуации, но и ситуации, пропущенные в связи с человеческим фактором, например отсутствие оператора на рабочем месте в момент фиксации нештатной ситуации.

В работе термин «аномалия» соответствуют по значению термину «пожароопасная ситуация», они оба определяются, как отклонение параметра или параметров датчика [1, 2] от типичных значений или отклонения функционального вида графика этих параметров от их типичного вида. Это значит, что обнаружение и классификация аномалий учитывает не только отклонения по значению, но и отклонения по функциональной форме, что может говорить об учитывании контекста анализируемых параметров [3–9].

Цель исследования заключается в представлении алгоритма на основе нейросетевых технологий, способного обнаруживать и классифицировать пожароопасные ситуации на фиксированные классы с заданными параметрами точности.

Алгоритм классификации. В работе для классификации используются нейросетевые технологии, которыми, в частности, являются рекуррентные нейронные сети (РНС) с долгосрочной памятью (LSTM).

Представим алгоритм классификации пожароопасных ситуаций на основе реализации с применением нейросетевых технологий [10, 11] на рис. 1.

Опишем подробнее алгоритм обучения разработанной нейронной сети:

1. Инициализация параметров: задание начальных значений для генератора случайных чисел и настройка зерна для генераторов случайных чисел модуля `python NumPy` и модуля `PyTorch`, это необходимо для повторяемости результатов обучения.
2. Чтение данных: загрузка данных датасета из CSV-файла и преобразование их в матрицу $m \times n$.
3. Нормализация данных [12–13]: преобразование данных в числовой формат с последующим применением метода нормализации входных данных посредством функции `MinMaxScaler` из модуля `sklearn`, повышающим устойчивость к вариациям данных, для более быстрой сходимости ошибки в ходе обучения нейронной сети.

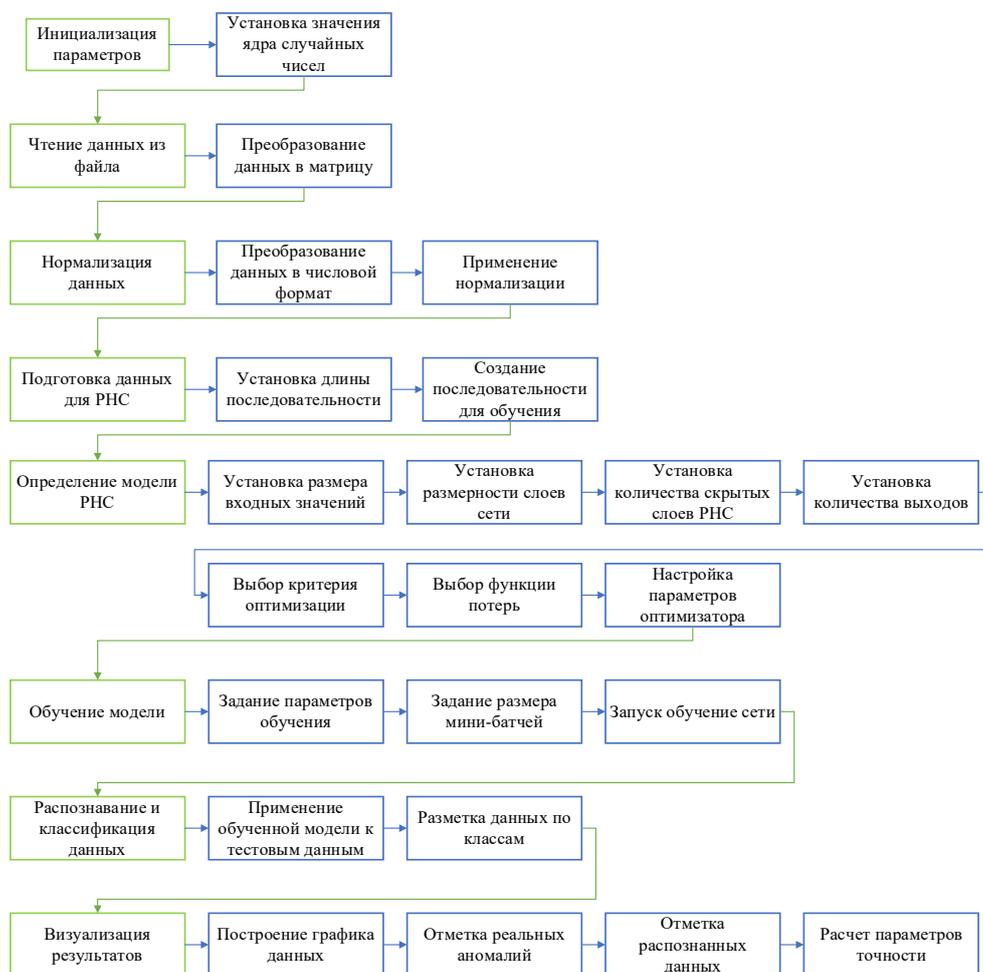


Рис. 1. Структурная схема алгоритма классификации пожароопасных ситуация на основе нейросетевых технологий

4. Подготовка данных для РНС: установка длины последовательности РНС и создание последовательности обучения [14].

5. Определение модели РНС: установка размера входных значений, т.е. количества параметров, используемых для обучения, установка размерности слоев сети, т.е. количества нейронов в скрытом слое сети, установка скрытых слоев РНС, установка количества выходов – задается количеством классифицируемых классов. Выбор критерия оптимизации Adam [15–16] и выбор функции потерь Cross-Entropy Loss [15–16], включение или выключение L2-регуляризации.

6. Обучение модели: настройка параметров обучения, задание размера мини-батчей, для оптимизации памяти во время обучения. Обучение модели на обучающих данных с использованием оптимизатора Adam и функции потерь Cross-Entropy Loss.

7. Распознавание и классификация данных: применение обученной модели к тестовым данным, что по сути является классификацией данных [17–18].

8. Отображение результатов: визуализация классифицированных данных в сравнении с реально существующими аномалиями с применением графических средств модуля matplotlib [18–20], расчет параметров точности. Более подробный расчет параметров точности можно получить в результате тестирования нейронной сети.

Упрощенная архитектура РНС представлена на рис. 2.

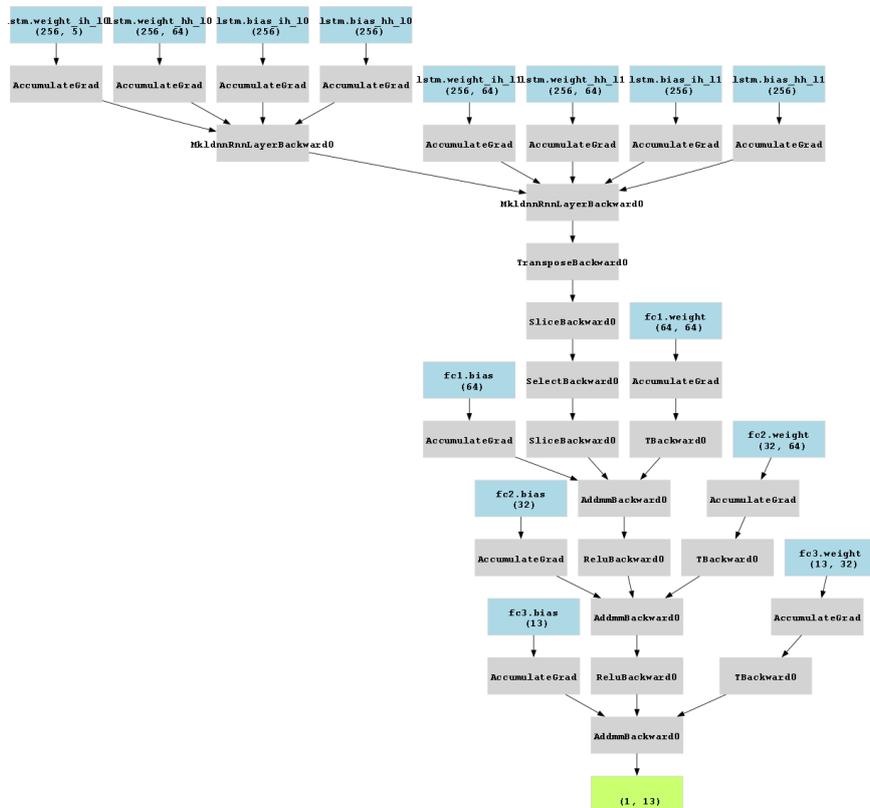


Рис. 2. Упрощенная архитектура рекуррентной нейронной сети классификации пожароопасных ситуаций на основе данных цифрового датчика

На рис. 2 упрощение связано с затруднением представлением полной архитектуры сети ввиду её масштабности, в частности не показываются все скрытые слои РНС [21].

Выбор классов. В рамках эксперимента осуществлялась классификация 13 пожароопасных ситуаций, нумерация классов начинается с 0:

0. Нормальные данные – аномалий в выделенном участке нет, либо они не могут быть обнаруженными с помощью данных из датчиков среднее значение температуры 10–40 градусов в зависимости от зоны размещения датчика, а значение задымленности 60 000–65 556 аналоговых отсчета.

1. Выход за пределы допустимой температуры вверх – плавное превышение температуры среднего значения на участке (10-40 градусов).

2. Выход за пределы допустимой температуры вниз - плавное снижение температуры среднего значения на участке (10-40).

3. Аномально высокие значения температуры – резкое и значительное повышение температуры более установленного значения (выше 55 градусов).

4. Выход за пределы допустимого значения задымленности вниз – плавное снижение задымленности ниже среднего значения на участке (задымленность ниже 60 000 отсчетов).

5. Дисперсия между датчиками дыма выходит за пределы определенного значения.

6. Аномально резкое и короткое увеличение задымленности (задымленность ниже 40 000 отсчетов).

7. Выход значения температуры за определённый верхний предел, а задымленности за определённый нижний предел (температура 10-40 градусов, задымленность ниже 60 000 отсчетов).

8. Выход значения температуры за определённый нижний предел, а задымленности за определённый нижний предел (температура 10-40 градусов, задымленность ниже 60 000 отсчетов).

9. Температуры превышает критическое значение – критическое значение настраивается в зависимости от места установки (в диапазоне 40-55 градусов).

10. Высокая задымленность – задымленность выше определенного уровня (ниже 50 000 аналоговых отсчетов).

11. Температуры и дым значительно превышают норму (температуры выше 55 градусов задымленность ниже 50 000 аналоговых отсчетов).

12. Неисправность датчика – единичные значительные превышения температуры или задымленности (температура более 55 градусов и задымленность ниже 40 000 отсчетов).

Пример разметки данных представлен на рис. 3.

Дата_и_время	Темп1	Темп2	Задымленность1	Задымленность2	Задымленность2	Аномалия по темп	Аномалия по дыму	Классы
0	1	2	3	4	5	6	7	8
03.08.2022 0:55	42.79	46.79	60117	60118	60123	1	0	1
03.08.2022 0:55	42.8	46.78	60117	60118	60122	1	0	1
03.08.2022 0:55	42.82	46.78	60119	60120	60118	1	0	1
03.08.2022 0:55	42.79	46.78	60120	60120	60119	1	0	1
03.08.2022 0:55	42.79	46.8	60120	60119	60119	1	0	1
03.08.2022 0:55	42.82	46.79	60121	60121	60124	1	0	1
03.08.2022 0:55	42.82	46.74	60121	60121	60120	1	0	1
03.08.2022 0:55	42.79	46.78	60118	60118	60117	1	0	1
03.08.2022 0:55	42.81	46.76	60118	60118	60118	1	0	1
03.08.2022 0:55	42.84	46.74	60122	60123	60122	1	0	1
03.08.2022 0:55	42.78	46.76	60121	60122	60122	1	0	1
03.08.2022 0:55	42.84	46.74	60117	60119	60119	1	0	1
03.08.2022 0:55	42.84	46.81	60118	60120	60119	1	0	1
03.08.2022 0:55	42.79	46.75	60122	60119	60119	1	0	1
03.08.2022 0:55	42.82	46.79	60118	60119	60124	1	0	1
03.08.2022 0:55	42.79	46.79	60117	60123	60123	1	0	1

Рис. 3. Пример разметки данных классов

На рис. 3 во второй строке 0-8, номер столбцов соответственно. В первом столбце приведено время отсчета, 2 и 3 параметры температуры, 4-6 параметры задымленности, 7 – аномалии по температуры, 8 – аномалии по задымленности, 9 общие класс аномалии.

Результаты тестирования модели. Тестирование алгоритма предиктивной классификации выполнялось на языке программирования Python в IDE PyCharm. Оценка точности сети осуществлялась по трем параметрам: общая точность системы, точность обнаружения аномалий, ошибка обнаружения. Дополнительно ошибки обнаружения подразделяются на необнаруженные аномалии и ложные аномалии. Рассмотрим подробнее каждый из параметров.

Общая точность системы представляет собой общую эффективность классификации всех классов, включая как нормальные, так и аномальные ситуации.

Формула общей точности (Accuracy) выглядит следующим образом:

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN}, \quad (1)$$

где TP (True Positives) – количество верно классифицированных аномалий;

TN (True Negatives) – количество верно классифицированных нормальных ситуаций;

FP (False Positives) – количество нормальных ситуаций, неправильно классифицированных как аномалии;

FN (False Negatives) – количество аномальных ситуаций, неправильно классифицированных как нормальные.

Точность обнаружения аномалий, этот параметр измеряет способность системы обнаруживать аномалии(пожароопасные ситуации).

Формула точности обнаружения аномалий выглядит так:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP},$$

Ошибка обнаружения включают в себя необнаруженные аномалии (False Negatives) и ложные аномалии (False Positives).

Формула ошибки обнаружения (Detection Error) может быть представлена как:

$$Detection\ Error = \frac{FN}{TP + TN + FP + FN} \quad (2)$$

Необнаруженные аномалии (False Negatives) – это количество аномальных ситуаций, которые были неправильно классифицированы как нормальные.

Ложные аномалии (False Positive) – это количество нормальных ситуаций, которые были неправильно классифицированы как аномалии.

Чтобы посчитать соотношение необнаруженных аномалий и ложных аномалий, которые являются составляющими ошибки обнаружения, можно использовать следующие формулы:

$$ignored = \frac{FN}{total - total * reacted} \quad (3)$$

$$fake = \frac{FP}{total - total * reacted'}$$

где total – общее количество отсчетов, ignored – доля необнаруженных аномалий, fake – доля ложных аномалий.

Требования к параметрам точности алгоритма классификации представлены в табл. 1

Таблица 1

Требования параметров точности

Accuracy, %	Presicion, %	Detection Error, %	ignored, %	fake, %
Не менее 90	Не менее 85	Не более 15	нет	нет

Тестирование обученной нейронной сети. В процессе тестирования нейронной сети используются две базы данных.

Первая обучающая выборка данных, содержит разделение данных по 5 параметрам: температура вне датчика, температура внутри датчика и три параметра задымленности, за основу взятые реальные данные обнаруженных аномалий в метрополитенах в местах установки комплекса взаимосвязанных датчиков. Всего в обучающую выборку вошло 126 дней, в каждом из дне содержатся метки обнаруженных аномалий, разделенных на классы. Каждый день состоит примерно из 18 часов ежесекундно записанных параметров. С целью снижения времени обучения и снижению риска возникновения переобучения, данные в базу данных заполнялись не ежесекундно, а с промежутком 5 секунд, т.к. эмпирически было выяснено, что при таком шаге заполнения показатели точности алгоритма практически не изменяются, в то время как время обучения существенно сокращается, этот эксперимент приведен в таблице, в качестве данных использовались данные первой выборки.

Таблица 2

Изменения параметров точности и времени обучения при различных шаге отсчетов данных

Шаг	Accuracy, %	Presicion, %	Detection Error, %	ignored, %	fake, %	Время обучения,с
1	99	91	9	71.65	28.35	10566
5	99	91	9	71.65	28.35	8755
10	92	86	11	77.25	22.75	6102
30	83	79	12	85.76	24.24	4652
60	75	72	15	90.22	9.78	2712

Вторая выборка данных состоит из тестовых данных их структура и подход к формированию базы данных аналогичный, отличается только размер выборки, он составляет 60 дней.

Результат моделирования представлен на рис. 3-5.

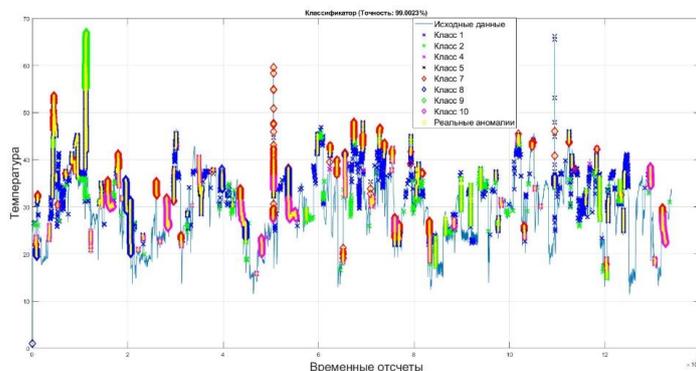


Рис. 4. График классификации данных из первой выборки

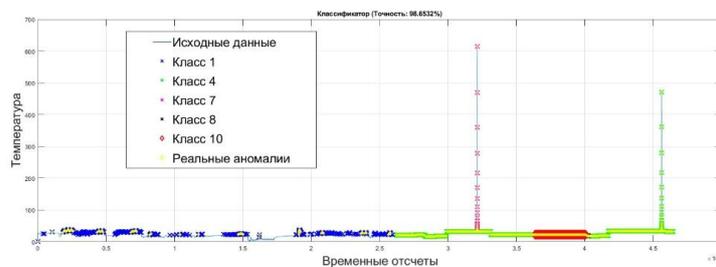


Рис. 5. График классификации данных из второй выборки

Полученные параметры точности приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры точности по двум выборкам данных

Номер выборки	Accuracy, %	Presicion, %	Detection Error, %	ignored, %	fake, %
1	99	91	9	71.65	25.35
2	98.65	97.36	2.64	63.45	36.55

Приблизительно один из участков график классификации данных из первой выборки представлен на рис. 6

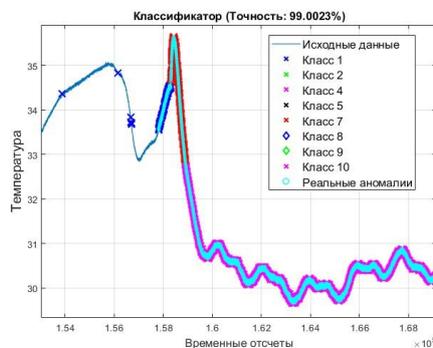


Рис. 6. График классификации данных на выделенном участке

Обсуждение. Анализируя полученные параметры точности после моделирования алгоритма с требованиями, поставленными в таблице, можно сделать вывод, что предложенный алгоритм классификации соответствует поставленным требованиям: accuracy (общая точность) не менее 90%, precision (точность обнаружения) не менее 85%, detection error (ошибка обнаружения) не более 15%. На обучающей выборке полученные следующие параметры точности: общая точность 99%, точность обнаружения 91%, ошибка обнаружения 9%, что не ниже поставленных требований. На тестовой выборке: общая точность 98.65%, точность обнаружения 97.36%, ошибка обнаружения 2.64%, что также не ниже поставленных требований. Исходя из полученных результатов предложенный алгоритм классификации, можно использовать для классификации данных получаемых из комплекса взаимосвязанных датчиков.

Полученные отклонения по значениям точности могут возникать из-за следующих проблем: несовершенство архитектуры нейронной сети, недостаточный размер обучающей выборки, недостаточное обучение и неправильный выбор гиперпараметров архитектуры нейронной сети. Анализ и решение этих проблем будет представлено в следующей публикации.

Заключение. Алгоритм классификации пожароопасных ситуаций с помощью нейросетевых может использоваться в качестве автоматической или автоматизированной системы классификации аномалий. Применение этого алгоритма повысит не только повысить эффективность принятия решения при обнаружении пожароопасной ситуации, но и позволяет распознавать аномалии, которые ранее не распознавались комплексом взаимосвязанных датчиков.

Дальнейшие исследования предполагают реализацию нейросетевой модели обнаружения пожароопасных ситуаций, с применением различных архитектур нейронных сетей, с целью выявления более эффективных по параметрам точности и быстродействия процесса классификации пожароопасных ситуаций посредством нейросетевых технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Саутин И.Г. Противопожарная защита: технологии и решения // Транспорт, Противопожарная защита. Пожарная автоматика. Средства спасения. – 2018.
2. Саутин И.Г. Особое мнение. Можно ли доверить свою жизнь дымовому пожарному извещателю? // Алгоритм безопасности. – 2019. – № 6.
3. Ермилов А.В., Смирнов В.А. Развитие интеллектуальной составляющей управленческой компетентности начальника караула пожарно-спасательной части // Технологии техносферной безопасности. – 2017. – № 3. – С. 178-185.
4. Полежаев П.В. [и др.]. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году: стат. сб. / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. – М.: ВНИИПО, 2021. – 112 с.
5. Зайцев А.В. Достоверность и своевременность обнаружения пожара, и как их учесть в нормах на СПС // Алгоритм безопасности. – 2016. – № 2.
6. Иванов А.Н., Викман А.В., Уткин О.В. Применение нечеткой логики для оценки вероятности выполнения пожарными извещателями функции основного назначения // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). – 2019. – № 4 (32). – С. 48-52.
7. Проневич О.Б., Шубинский И.Б. Автоматизированная система прогнозирования пожарной безопасности объектов железнодорожного транспорта на основе оценки рисков // Надежность. – 2019. – 19 (1). – С. 48-54. – Режим доступа: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-1-48-54>. (дата обращения 25.01.23).
8. Иванов А.Н. К вопросу об оценке эффективности пожарной автоматики // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: Матер. Всерос. науч.-практ. конф. – СПб.: Ун-т ГПС МЧС России, 2021.
9. Преснов А.И. [и др.]. Пожарная техника: учеб.: в 2-х ч. Ч. 2. – СПб.: Ун-т ГПС МЧС России, 2016. – 404 с.
10. Рассел Джесси. Ассоциативная память на нейронных сетях. – М.: VSD, 2018. – 804 с.
11. Solovyeva E. Types of recurrent neural networks for non-linear dynamic system modelling // Proceedings of 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM2017). – St. Petersburg: Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI». Russia, St. Petersburg, May 24–26, 2017. – P. 1-4.

12. Wang, Z., Yan, W., Oates, T. Time series classification from scratch with deep neural networks: A strong baseline // In: 2017 International Joint Conference on Neural Networks. – IJCNN, IEEE, 2017. – P. 1578-1585.
13. Kate R.J. Using dynamic time warping distances as features for improved timeseries classification // Data Min. Knowl. Discov. – 2016. – 30 (2). – P. 283-312.
14. Peng Y., Kondo N., Fujiura T., Suzuki T., Ouma S., Yoshioka H., Itoyama E., et al. Dam behavior patterns in Japanese black beef cattle prior to calving: Automated detection using LSTM-RNN // Comput. Electron. Agric. – 2020. – 169. – 105178.
15. Rahman A., Smith D., Little B., Ingham A., Greenwood P., Bishop-Hurley G. Cattle behaviour classification from collar, halter, and ear tag sensors // Inform. Process. Agric. – 2018. – 5 (1). – P. 124-133.
16. Abandah G., Abdel-Karim A. Accurate and fast recurrent neural network solution for the automatic diacritization of Arabic text // Jordan. J. Comp. Inform. Technol. – 2020. – 6 (2). – P. 103-121.
17. Géron A. Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, tools, and techniques to build intelligent systems. – O'Reilly Media, 2019.
18. Google TensorFlow, TensorFlow. – <https://www.tensorflow.org/>. – 2024 (дата обращения: 22.01.2023).
19. Graves A., Mohamed A.R., Hinton G. Speech recognition with deep recurrent neural networks // In: 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. – 2013. – P. 6645-6649.
20. PyTorch documentation. <https://pytorch.org/docs/stable/index.html> (дата обращения: 21.01.2023)
21. Candalaria M.D.E., Chua N.M.M., Kee S.-H. Evaluation of Heat-Induced Damage in Concrete Using Machine Learning of Ultrasonic Pulse Waves, Materials (Basel). – 2022. – 15 (22). – 7914. –<https://doi.org/10.3390/ma15227914>.

REFERENCES

1. Sautin I.G. Protivopozharnaya zashchita: tekhnologii i resheniya [Fire protection: technologies and solutions], *Transport, Protivopozharnaya zashchita. Pozharnaya avtomatika. Sredstva spaseniya* [Transport, Fire protection. Fire automatics. Rescue means], 2018.
2. Sautin I.G. Osoboe mnenie. Mozhno li doverit' svoyu zhizn' dymovomu pozharnomu izveshchatel'yu? [Special opinion. Can you trust your life to a smoke alarm?], *Algoritm bezopasnosti* [Security algorithm], 2019, No. 6.
3. Ermilov A.V., Smirnov V.A. Razvitie intellektual'noy sostavlyayushchey upravlencheskoy kompetentnosti nachal'nika karaula pozharno-spatel'noy chasti [Development of the intellectual component of managerial competence of the chief of the guard of the fire and rescue unit], *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti* [Technosphere safety technologies], 2017, No. 3, pp. 178-185.
4. Polekhin P.V. [i dr.]. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2020 godu: Sb. statey [Fires and fire safety in 2020: stat. sat.], under general ed. D.M. Gordienko. Moscow: VNIPO, 2021, 112 p.
5. Zaytsev A.V. Dostovernost' i svoevremennost' obnaruzheniya pozhara, i kak ikh uchest' v normakh na SPS [Reliability and timeliness of fire detection, and how to take them into account in the standards for fire protection systems], *Algoritm bezopasnosti* [Safety Algorithm], 2016, No. 2.
6. Ivanov A.N., Vikman A.V., Utkin O.V. Primenenie nechetkoy logiki dlya otsenki veroyatnosti vypolneniya pozharnymi izveshchatel'yami funktsii osnovnogo naznacheniya [Application of fuzzy logic to assess the probability of fire detectors performing their main function], *Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty)* [Natural and man-made risks (physical, mathematical and applied aspects)], 2019, No. 4 (32), pp. 48-52.
7. Pronevich O.B., SHubinskiy I.B. Avtomatizirovannaya sistema prognozirovaniya pozharnoy bezopasnosti ob"ektov zheleznodorozhnogo transporta na osnove otsenki riskov [Automated system for predicting fire safety of railway transport facilities based on risk assessment], *Nadezhnost'* [Reliability], 2019, 19 (1), pp. 48-54. Available at: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-1-48-54>. (data obrashcheniya 25.01.23).
8. Ivanov A.N. K voprosu ob otsenke effektivnosti pozharnoy avtomatiki [On the issue of assessing the effectiveness of fire automatics // Fire safety: modern challenges], *Pozharnaya bezopasnost': sovremennye vyzovy. Problemy i puti resheniya: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Fire safety: modern challenges. Problems and solutions: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg: Un-t GPS MCHS Rossii, 2021.
9. Presnov A.I. [i dr.]. Pozharnaya tekhnika: ucheb. [Firefighting equipment: textbook]: in 2nd part. Part 2. Saint Petersburg: Un-t GPS MCHS Rossii, 2016, 404 p.
10. Rassel Dzhessi. Assotsiativnaya pamyat' na neyronnykh setyakh [Associative memory on neural networks]. Moscow: VSD, 2018, 804 p.

11. Solovyeva E. Types of recurrent neural networks for non-linear dynamic system modeling, *Proceedings of 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM2017)*. St. Petersburg: Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI». Russia, St. Petersburg, May 24–26, 2017, pp. 1-4.
12. Wang, Z., Yan, W., Oates, T. Time series classification from scratch with deep neural networks: A strong baseline, *In: 2017 International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN, IEEE, 2017*, pp. 1578-1585.
13. Kate R.J. Using dynamic time warping distances as features for improved timeseries classification, *Data Min. Knowl. Discov.*, 2016, 30 (2), pp. 283-312.
14. Peng Y., Kondo N., Fujiura T., Suzuki T., Ouma S., Yoshioka H., Itoyama E., et al. Dam behavior patterns in Japanese black beef cattle prior to calving: Automated detection using LSTM-RNN, *Comput. Electron. Agric.*, 2020, 169, 105178.
15. Rahman A., Smith D., Little B., Ingham A., Greenwood P., Bishop-Hurley G. Cattle behaviour classification from collar, halter, and ear tag sensors, *Inform. Process. Agric.*, 2018, 5 (1), pp. 124-133.
16. Abandah G., Abdel-Karim A. Accurate and fast recurrent neural network solution for the automatic diacritization of Arabic text, *Jordan. J. Comp. Inform. Technol.*, 2020, 6 (2), pp. 103-121.
17. Géron A. Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, tools, and techniques to build intelligent systems. O'Reilly Media, 2019.
18. Google TensorFlow, TensorFlow. Available at: <https://www.tensorflow.org/>. 2024 (accessed 22 January 2023).
19. Graves A., Mohamed A.R., Hinton G. Speech recognition with deep recurrent neural networks, *In: 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* 2013, pp. 6645-6649.
20. PyTorch documentation. Available at: <https://pytorch.org/docs/stable/index.html> (accessed 21 January 2023).
21. Candelaria M.D.E., Chua N.M.M., Kee S.-H. Evaluation of Heat-Induced Damage in Concrete Using Machine Learning of Ultrasonic Pulse Waves, *Materials (Basel)*, 2022, 15 (22), 7914. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma15227914>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.А. Кравченко.

Сингх Сани – Южный федеральный университет; e-mail: singkh@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79885751350; кафедра систем автоматического управления; аспирант.

Прибыльский Алексей Васильевич – e-mail: apribylsky@sfedu.ru; тел.: +79885619718; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Singh Sanni – Southern Federal University; e-mail: singkh@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79885751350; the Department of Automatic Control Systems; graduate student.

Pribylskiy Alexey Vasilievich – e-mail: apribylsky@sfedu.ru; phone: +79885619718; the Department of Automatic Control Systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 007.519.816

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-147-158

С.И. Родзин, А.В. Боженюк, Е.В. Нужнов

МЕТОД МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ГРУППОВОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКИХ КОЛЕБЛЮЩИХСЯ МНОЖЕСТВ*

При возникновении чрезвычайной ситуации необходимо принять эффективные экстренные меры. Известно, что аварийное событие обладает характеристиками ограниченности времени и информации, вредоносности и неопределенности, а лица, принимающие решения, часто ограничены в рациональности в условиях неопределенности и риска. Психологическое поведение людей следует учитывать в реальных процессах принятия решений. Принятие решений в чрезвычайных ситуациях является актуальной задачей и предметом исследовательских интересов. В этой статье представ-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-71-10121, <https://rscf.ru/project/22-71-10121/> в Южном федеральном университете.

лен новый подход к принятию экстренных решений с использованием нечетких колеблющихся множеств. Для определения весов критериев строится математическая модель, которая позволяет преобразовать значения критериев в совместимую шкалу и исключить влияние различных шкал для их измерений. Чтобы отобразить психологическое поведение лиц, принимающих решения, вводится функция степени группового удовлетворения и функция ценности воспринимаемой полезности альтернативы. Вычисляется и ранжируется полезность альтернатив, приводится пример исследования чрезвычайной ситуации. По сравнению с существующими методами предлагаемый метод к принятию решений в условиях чрезвычайной ситуации имеет следующие особенности: расширяются возможности для определения весов критериев принятия решений, когда критерии имеют различную шкалу; метод учитывает психологию ЛПР, в отличие от известных подходов, предполагающих рациональность решений ЛПР; по сравнению с теорией проспектов метод не требует субъективной оценки уровня ожиданий, использует меньшее количество параметров, что расширяет область его применения. Предложенный метод также имеет некоторые ограничения: требуются определенные вычислительные затраты при большом количестве альтернативных решений и характеризующих их атрибутов. Однако это ограничение преодолевается при использовании программного обеспечения, такого как MATLAB. Интересной представляется возможность в будущем применить предлагаемый метод для задач оценки риска при принятии решений в условиях нечеткой информации, если значения атрибутов являются случайными величинами.

Нечеткое колеблющееся множество; групповое лицо принимающее решение; многокритериальная задача; оператор; агрегирование; теория проспектов; теория сожаления; чрезвычайная ситуация.

S.I. Rodzin, A.V. Bozhenyuk, E.V. Nuzhnov

METHOD OF MULTI-CRITERIA GROUP DECISION-MAKING IN AN EMERGENCY SITUATION USING FUZZY HESITANT SETS

In case of an emergency, effective emergency measures must be taken. It is known that an emergency event has the characteristics of limited time and information, harmfulness and uncertainty, and decision makers are often limited in rationality in conditions of uncertainty and risk. People's psychological behavior should be taken into account in real decision-making processes. Decision-making in emergency situations is an urgent task and the subject of research interests. This article presents a new approach to emergency decision-making using fuzzy oscillating sets. To determine the weights of the criteria, a mathematical model is built that allows you to convert the values of the criteria into a compatible scale and exclude the influence of different scales for their measurements. In order to display the psychological behavior of decision makers, a function of the degree of group satisfaction and a function of the value of the perceived usefulness of the alternative are introduced. The usefulness of alternatives is calculated and ranked, and an example of an emergency study is given. Compared with existing methods, the proposed method for decision-making in an emergency situation has the following features: the possibilities for determining the weights of decision-making criteria are expanded when the criteria have a different scale; the method takes into account the psychology of LPR, unlike well-known approaches that assume the rationality of LPR decisions; compared with the theory of prospectuses, the method does not require a subjective assessment of the level of It uses fewer parameters, which expands the scope of its application. The proposed method also has some limitations: certain computational costs are required with a large number of alternative solutions and their characteristic attributes. However, this limitation is overcome when using software such as MATLAB. It is interesting to consider the possibility in the future to apply the proposed method for risk assessment tasks when making decisions in conditions of fuzzy information, if the attribute values are random variables.

Fuzzy hesitant set; group decision maker; multi-criteria task; operator; aggregation; prospect theory; regret theory; emergency.

Введение. Количество чрезвычайных ситуаций, связанных с промышленными авариями, террористическими атаками и природными бедствиями, несущих отрицательные последствия для жизнедеятельности людей большими материальными потерями, возрастает ежегодно в геометрической прогрессии. Когда происходит чрезвычайное событие, лица, принимающие решения (ЛПР), должны сформулировать планы или выбрать эффективную альтернативу чрезвычайной ситуации, чтобы предотвратить ее дальнейшее ухудшение. Принятие решений в чрезвычайных ситуациях является актуальной задачей и предметом исследовательских интересов.

Практика показывает, что ЛПР зачастую ограничены в рациональности принимаемых решений в условиях неопределенности и риска [1]. Следовательно, психологическое поведение людей следует учитывать в реальных процессах принятия решений. Особенностью реагирования на чрезвычайные ситуации является своевременность, а также наличие неопределенной информации о чрезвычайной ситуации. Необходимо разрабатывать методы принятия решений с учетом поведения людей. В [2] предложили метод принятия решений, связанных с оценкой риска, основанный на теории кумулятивных проспектов, для решения проблемы принятия решений о риске при реагировании на чрезвычайные ситуации. В [3] представлен метод интервальных динамических контрольных точек, основанный на теории проспектов для принятия экстренных решений. Оба подхода не лишены недостатков при принятии решений – они не объясняют многие аспекты принятия решений и риска ЛПР. Необходимы более реалистичные модели принятия решений. В [4] предложена так называемая теория сожаления для решения многокритериальных проблем принятия решений, где значения атрибутов критериев представлены в форме интервальных чисел. В [5] исследовался нечеткий подход к принятию ЛПР групповых решений с несколькими атрибутами с неполной информацией, учитывающий теорию сожаления. В [6] предложен стохастический метод принятия решений, основанный на теории сожаления и методе TOPSIS.

Необходимы новые инструменты для моделирования многокритериального группового принятия решений в чрезвычайной ситуации с использованием нечетких множеств. Одним из таких инструментов являются колеблющиеся нечеткие множества (*Hesitant Fuzzy Set, HFS*) [7], моделирующие ситуации, когда люди колеблются в отношении того или иного решения. Например, при возникновении чрезвычайной ситуации следует принять меры для минимизации риска и потерь. Процесс выбора альтернатив можно интерпретировать как экстренное принятие решений с учетом суждений нескольких экспертов. Обычно мнения разделяются и прийти к согласию сложно. Именно в подобного рода ситуациях актуальным становится применение *HFS*. Способность *HFS* отображать нечеткость и сохранять исходную информацию привлекли внимание исследователей в [8], где был предложен подход к применению *HFS* в ситуации принятия экстренных решений, основанный на теории рациональных решений.

В данной статье исследуется подход, при котором необходимо количественно выразить колебания ЛПР в нечетких условиях и определить веса критериев в процессе принятия решений. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- ◆ рассчитать значения полезности альтернатив и отразить колебания ЛПР в контексте нечеткой среды;
- ◆ определить веса критериев принятия решений с атрибутами разной размерности;
- ◆ разработать метод на основе *HFS* для принятия экстренных решений при возникновении чрезвычайной ситуации в условиях неопределенности и риска.

Нечеткие колеблющиеся множества и теория сожаления. Предположим, что X – некоторое базовое множество. Тогда *HFS* определяется как колеблющееся нечеткое множество на X на интервале $[0, 1]$ [38]:

$$HFS = \{ \langle x, h_{HFS}(x) \rangle | x \in X \}, \quad (1)$$

Здесь $h_{HFS}(x)$ является колеблющимся нечетким элементом (*HFE*), который обозначает возможные степени принадлежности $x \in X$ множеству *HFS*.

В [38] были также представлены операции над *HFS* и оператор колеблющегося нечетко-взвешенного усреднения (*HFWA*).

Среднее значение *HFS* определяется как

$$s(HFS) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n h_{HFS}(x_j), x_j \in X, j = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Стандартное отклонение равно

$$\sigma(HFS) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (s(h_{HFS}(x_j)) - s(HFS))^2}. \quad (3)$$

Теория сожаления была представлена в [10]. Согласно теории сожаления, ЛПР радуются тому, что выбранная альтернатива принесет лучшие результаты, нежели другие; в противном случае они чувствуют сожаление.

Пусть x_1 и x_2 являются результатами, полученными при выборе альтернатив A_1 и A_2 соответственно, тогда предполагаемая полезность альтернативы A_1 определяется следующим образом:

$$u(x_1, x_2) = v(x_1) + R(v(x_1) - v(x_2)). \quad (4)$$

Здесь v обозначает функцию полезности, а R – функцию сожаления, которая обозначает разницу между двумя значениями полезности альтернатив A_1 и A_2 . Если $R > 0$, то ЛПР позитивно воспринимают выбранную альтернативу, иначе – чувствуют сожаление.

В общем случае функция $v(x)$ является степенной и служит для количественной оценки значения полезности:

$$v(x) = x^\alpha (\alpha \in [0,1]),$$

где α обозначает коэффициент неприятия риска ЛПР. Чем меньше α , тем больше неприятие риска у ЛПР. Влияние параметра α на функцию полезности $v(x)$ представлено на рис. 1.

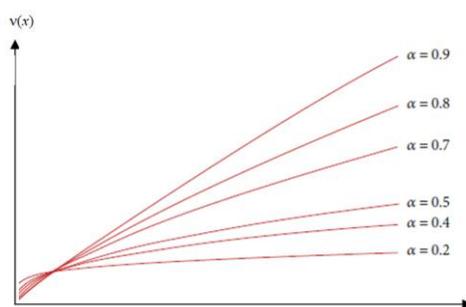


Рис. 1. График степенной функции полезности $v(x)$ в зависимости от параметра α

Функция R является строго возрастающей и вогнутой:

$$R(x) = 1 - \exp(-\delta \cdot x),$$

где $\delta \in [0, 1]$ обозначает коэффициент сожаления/радости. Влияние параметра δ на функцию сожаления/радости показано на рис. 2.

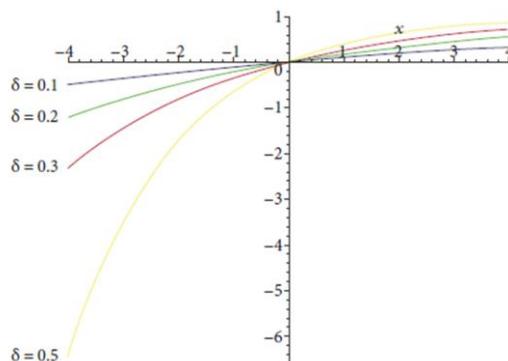


Рис. 2. График функции сожаления/радости R в зависимости от параметра δ

На практике оптимальную альтернативу необходимо выбирать из множества альтернатив. Поэтому воспринимаемую полезность альтернативы A_i ($i=1, 2, \dots, m$) можно определить следующим образом:

$$u_i = v(x_i) + R(v(x_i) - v(x^*)). \quad (5)$$

Здесь $x^* = \max_{1 \leq i \leq m} \{x_i\}$. В теории сожаления классическая функция полезности модифицируется за счет включения слагаемого «сожаление/радость». Следовательно, воспринимаемая полезность для ЛПР той или иной альтернативы состоит из двух компонентов: полезности и сожаления/радости.

Постановка задачи. Стихийные бедствия происходят все чаще и наносят серьезный экономический и социальный ущерб [11]. Принятие экстренных решений играет важную роль в чрезвычайных ситуациях [12].

Пусть $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$ – множество альтернатив, $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ – множество атрибутивных критериев, весовой вектор которых равен

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T, \text{ причём } \sum_{j=1}^n w_j = 1, 0 \leq w_j \leq 1, j = 1, 2, \dots, n.$$

Для принятия решений привлекаются Δ_k экспертов ($k = 1, 2, \dots, \phi$).

Информация о весах критериев неизвестна из-за неясности ситуации и нечеткой информации. Предположим, что эксперты оценивают альтернативы Y_i относительно критериев C_j . Пусть результатом их оценивания является $D_k = (h_{ij}^k)_{m \times n}$ – нечеткая колеблющаяся матрица решений. Здесь h_{ij}^k (HFE), обозначает заданную экспертом колеблющуюся степень принадлежности i -й альтернативы j -му критерию.

Атрибуты критериев могут относиться к разным типам и быть разнонаправленными. Их необходимо нормализовать, представив в виде следующей матрицы:

$$R_k = (r_{ij}^k)_{m \times n} = \begin{matrix} & C_1 & \dots & C_n \\ Y_1 & r_{11}^k \dots & r_{1j}^k \dots & r_{1n}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_m & r_{m1}^k \dots & r_{mj}^k \dots & r_{mn}^k \end{matrix} \quad (6)$$

$$\text{где } r_{ij}^k = \begin{cases} h_{ij}^k, & \text{для атрибута пользы } C_j, \\ (h_{ij}^k)^c, & \text{для атрибута стоимости } C_j, \end{cases} \quad (7)$$

$$j=1, 2, \dots, n, k=1, 2, \dots, \phi.$$

Подход к определению весов критериев. При принятии решений с использованием нескольких критериев их вес является одним из основных факторов, влияющих на результаты решения. Предлагается новый подход для определения весов критериев. Подход основан на следующей природной аналогии [13]. При налипании воды в емкость с неровным дном можно обнаружить, что высота приподнятой части дна изменяется обратно пропорционально объему воды. Это описывается следующей формулой [14]:

$$T = \sum_{j=1}^n \log_2 \left(1 + \frac{\alpha_j^2 P_j}{\sigma_j^2} \right), \quad (8)$$

где T – пропускная способность потока воды, α_j – коэффициент, P_j – заданная мощность, σ_j – дисперсия. Чтобы определить веса критериев, построим оптимизационную модель, основанную на процессе заполнения водой емкости с неровным дном.

Пусть w_j – вес критерия C_j , такой, что $\sum_{j=1}^n w_j = 1$; $0 \leq w_j \leq 1$; $j = 1, 2, \dots, n$. Тогда общий вес критериев равен

$$T_w = \sum_{j=1}^n \log_2 \left[1 + \left(\frac{s(C_j)}{\sigma(C_j)} \right)^2 \cdot w_j \right]. \quad (8)$$

Здесь $s(C_j)$ и $\sigma(C_j)$ представляют собой среднее и стандартное отклонение критерия C_j соответственно, которые рассчитываются согласно (2) и (3). Чем больше значение T_w , тем больший вес присваивается критерию:

$$\max T_w = \sum_{j=1}^n \log_2 \left[1 + \left(\frac{s(C_j)}{\sigma(C_j)} \right)^2 \cdot w_j \right]; \sum_{j=1}^n w_j = 1, 0 \leq w_j \leq 1. \quad (9)$$

Чтобы построить модель для определения весов критериев при колебании ЛПР при принятии решений в нечеткой среде, строится функция Лагранжа:

$$L(\xi, w) = \sum_{j=1}^n \log_2 \left[1 + \left(\frac{s(C_j)}{\sigma(C_j)} \right)^2 \cdot w_j \right] + \xi \cdot \left(\sum_{j=1}^n w_j - 1 \right), \quad (10)$$

где ξ обозначает множитель Лагранжа и является действительным числом.

Дифференцируя (10) по ξ и w_j и приравняв их нулю, получим следующие уравнения:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial w_j} = \frac{1}{\ln 2 \cdot (1 + (s(C_j)/\sigma(C_j))^2 \cdot w_j)} \cdot \left(\frac{s(C_j)}{\sigma(C_j)} \right)^2 + \xi = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \xi} = \sum_{j=1}^n w_j - 1 = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Решая систему уравнений (11), вычисляем веса критериев:

$$w_j = \frac{1}{n} \left[1 + \sum_{j=1}^n \left(\frac{\sigma(C_j)}{s(C_j)} \right)^2 \right] - \left(\frac{\sigma(C_j)}{s(C_j)} \right)^2, j = 1, 2, \dots, n. \quad (12)$$

Здесь безразмерная величина $\frac{\sigma(C_j)}{s(C_j)}$ определяет степень изменчивости веса относительно среднего значения. С помощью (12) получаем более объективные и разумные веса критериев.

Метод, основанный на теории сожаления, для многокритериального группового принятия решений в чрезвычайной ситуации с использованием нечетких колеблющихся множеств. Принимая решения в чрезвычайной ситуации, ЛПР обычно колеблются в отношении того или иного решения. Используем *HFE* для моделирования этой ситуации. Понятно, что чем меньше расхождений между членами группового ЛПР, тем более последовательным является решение и тем более удовлетворительными являются его результаты. Введем индекс для измерения степени удовлетворенности группы ЛПР.

Пусть h – колеблющийся нечеткий элемент *HFE*. Тогда индекс степени удовлетворенности группы ЛПР определяется как

$$G(h) = \frac{s(h)}{1 + \sigma(h)}. \quad (13)$$

Стандартное отклонение $\sigma(h)$ в (13) отражает уровень согласованности в группе ЛПР. Чем меньше значение $\sigma(h)$, тем выше согласованность, а чем больше $s(h)$, тем выше степень удовлетворенности группы $G(h)$.

Зная степень групповой удовлетворенности, предлагается следующий подход к колеблющемуся нечеткому принятию решений в чрезвычайной ситуации.

Определяется значение сожаления/радости для альтернативы A_i по отношению к критерию C_j :

$$R_{ij} = R \left(v \left(G(h_{ij}) \right) - v \left(G(h_j^*) \right) \right), i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n. \quad (14)$$

Здесь R представляет собой функцию сожаления/радости

$$(R(x) = 1 - \exp(-\delta \cdot x)),$$

а величина $G(h_j^*) = \max_{1 \leq i \leq m} \{G(h_{ij})\}$.

Поскольку $G(h_{ij}) \leq G(h_j^*)$, то $R_{ij} \leq 0$. В этом случае R_{ij} представляет собой значение сожаления. Тогда согласно (4) мы можем получить матрицу воспринимаемой полезности $U = (u_{ij})_{m \times n}$, где

$$u_{ij} = v \left(G(h_{ij}) \right) + R(v(G(h_{ij})) - v(G(h_j^*))), i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n. \quad (15)$$

Соответственно, общая воспринимаемая ценность полезности для каждой альтернативы A_i определяется как

$$u_i = \sum_{j=1}^n u_{ij} w_j, i = 1, 2, \dots, m. \quad (16)$$

Чем больше u_i , тем предпочтительнее альтернатива A_i . Таким образом, появляется возможность ранжировать альтернативы по u_i .

Предлагаемый метод включает следующие шаги.

Шаг 1. Для принятия экстренных решений при возникновении чрезвычайной ситуации в условиях неопределенности и риска экспертам оцениваем множество $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$ альтернатив по критериям $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, где все их атрибутивные значения представлены колеблющимися нечеткими элементами в форме *HFE*. Эксперты оценивают альтернативы Y_i относительно критериев C_j . Результатом их оценивания является $D_k = (h_{ij}^k)_{m \times n}$ – колеблющаяся нечеткая матрица решений.

Шаг 2. Нормализуем матрицы $D_k = (h_{ij}^k)_{m \times n}$, получив согласно (6), (7) матрицы $R_k = (r_{ij}^k)_{m \times n}$. Агрегируем согласно [9] индивидуальные матрицы в матрицу коллективных колеблющихся нечетких решений $R = (r_{ij})_{m \times n}$.

Шаг 3. Определяем веса критериев w_j ($j = 1, 2, \dots, n$) согласно (12).

Шаг 4. Определяем степень удовлетворенности группы $G(h_j^*)$ и строим матрицу воспринимаемой полезности $U = (u_{ij})_{m \times n}$, где u_{ij} рассчитывается согласно (15).

Шаг 5. Рассчитываем общую воспринимаемую ценность полезности для каждой альтернативы согласно (16) и ранжируем альтернативы по u_i .

Шаг 6. Конец.

Пример. Рассмотрим пример принятия экстренных решений в качестве иллюстрации предлагаемого метода, а также попробуем сравнить метод с другими подходами.

Произошел пожар и взрыв на складе опасных химикатов. В результате аварии имеются погибшие и госпитализированные, большие экономические потери, загрязнение окружающей среды и неблагоприятные социальные последствия. Необходимо обеспечить эффективный способ реагирования на чрезвычайную ситуацию, чтобы избежать дополнительных потерь.

При рассмотрении требований к реагированию на чрезвычайную ситуацию необходимо учитывать следующие критерии и факторы:

C_1 – организация эвакуации и спасения жизней пострадавших;

C_2 – мониторинг ситуации, обнаружение скрытых опасностей;

C_3 – предотвращение других взрывов.

Предположим, что имеются три альтернативы $\{Y_1, Y_2, Y_3\}$ и два эксперта, которые контролируют процесс реагирования на чрезвычайную ситуацию и оценивают альтернативы по критериям, представленным выше. Применим предложенный метод для выбора оптимальной альтернативы.

Шаг 1. Эксперты оценивают альтернативы Y_1, Y_2, Y_3 относительно критериев C_1, C_2, C_3 . Результатом их оценивания являются две колеблющиеся нечетких матрицы D_1 и D_2 :

D_1	C_1	C_2	C_3	D_2	C_1	C_2	C_3
Y_1	{0,6; 0,7}	{0,7}	{0,4; 0,6}	Y_1	{0,7}	{0,5}	{0,3; 0,4; 0,5}
Y_2	{0,6}	{0,6; 0,7}	{0,4}	Y_2	{0,5; 0,7}	{0,6}	{0,3}
Y_3	{0,6}	{0,5}	{0,5; 0,7}	Y_3	{0,6; 0,8}	{0,4}	{0,5}

Шаг 2. C_1, C_2, C_3 являются критериями пользы. Поэтому агрегируем согласно [9] индивидуальные матрицы решений D_1 и D_2 в коллективную матрицу D в предположении, что оба эксперта имеют одинаковый вес:

D	C_1	C_2	C_3
Y_1	{0,6536; 0,7}	{0,6127}	{0,3519; 0,4; 0,4523; 0,4708; 0,5; 0,5528}
Y_2	{0,5528; 0,6536}	{0,5999; 0,6536}	{0,3519}
Y_3	{0,5999; 0,7171}	{0,4523}	{0,5; 0,6127}

Шаг 3. Согласно (12) определяем веса критериев:

$$w_1 = 0,3496;$$

$$w_2 = 0,3322;$$

$$w_3 = 0,3182.$$

Шаг 4. Вычисляем матрицу степени удовлетворенности группы $G = (g_{ij})_{3 \times 3}$ согласно (13):

$$G = \begin{pmatrix} 0,6553 & 0,6127 & 0,4253 \\ 0,5631 & 0,6039 & 0,3519 \\ 0,6081 & 0,4523 & 0,5153 \end{pmatrix}$$

Определяем степень удовлетворенности группы $G(h_j^*)$ и строим матрицу воспринимаемой полезности $U = (u_{ij})_{3 \times 3}$, где u_{ij} рассчитывается согласно (15):

$$U = \begin{pmatrix} 0,6894 & 0,6498 & 0,4449 \\ 0,5771 & 0,6391 & 0,3500 \\ 0,6322 & 0,4507 & 0,5580 \end{pmatrix}$$

Значение коэффициента $\alpha = 0,88$ устанавливается в соответствии с [15], а значение $\delta = 0,3$ согласно [16].

Шаг 5. Рассчитываем общую воспринимаемую ценность полезности для каждой альтернативы согласно (16):

$$u_1 = 0,5984;$$

$$u_2 = 0,5254;$$

$$u_3 = 0,5483.$$

Ранжируем альтернативы по u_i : $Y_1 > Y_3 > Y_2$. Таким образом оптимальной альтернативой является Y_1 .

Сравним на данном примере предлагаемый метод с другими известными подходами.

В [17] для решения проблемы принятия экстренных решений предлагался известный метод, основанный на теории проспектов. Как и в рассмотренном выше примере предполагалось, что два эксперта имеют одинаковый вес, а колеблющиеся нечеткие отношения предпочтений были представлены двумя экспертами следующим образом:

$$P_1 = P_2 = \begin{bmatrix} \{0,5\} & \{0,6\} & \{0,6\} \\ \{0,4\} & \{0,5\} & \{0,5\} \\ \{0,4\} & \{0,5\} & \{0,5\} \end{bmatrix}.$$

Уровень ожиданий каждого из экспертов являлся следующим:

$$L_1 = (0,5; 0,6; 0,4),$$

$$L_2 = (0,6; 0,4; 0,4).$$

$$\text{Вектор приоритета критериев } W^1 = W^2 = (0,4; 0,3; 0,3)^T.$$

Затем по методу перспектив в [17] были построены соответствующие колеблющиеся нечеткие матрицы решений. Оптимальной альтернативой оказалась Y_2 : $Y_2 > Y_1 > Y_3$.

Этот результат отличается от результата, полученного предлагаемым методом. Метод, предложенный в [17], требует от ЛПР субъективной оценки уровня ожиданий, кроме того, по сравнению с предлагаемым подходом, расчетная формула теории проспектов включает в себя больше параметров, что усложняет принятие решения. К тому же метод проспектов требует от экспертов попарного сравнения критериев, имеющих разные типы.

В [18] представлен подход, основанный на методе TOPSIS (определение оптимального решения по близости с идеальным решением), для колеблющегося принятия решений с нечеткими атрибутами. Для рассмотренного выше примера согласно методу [18] коллективная матрица D в предположении, что оба эксперта имеют одинаковый вес, имеет следующий вид:

D	C_1	C_2	C_3
Y_1	{0,6536; 0,6536; 0,6536; 0,6536; 0,6536; 0,7}	{0,6127; 0,6127; 0,6127; 0,6127; 0,6127; 0,6127}	{0,3519; 0,4000; 0,4523; 0,4708; 0,5101; 0,5528}
Y_2	{0,5528; 0,5528; 0,5528; 0,5528; 0,5528; 0,6536}	{0,5999; 0,5999; 0,5999; 0,5999; 0,5999; 0,6536}	{0,3519; 0,3519; 0,3519; 0,3519; 0,3519; 0,3519}
Y_3	{0,5999; 0,5999; 0,5999; 0,5999; 0,5999; 0,7171}	{0,4523; 0,4523; 0,4523; 0,4523; 0,4523; 0,4523}	{0,5000; 0,5000; 0,5000; 0,5000; 0,5000; 0,6127}

Отсюда были определены веса атрибутов:

$$w_1 = 0,1818;$$

$$w_2 = 0,3875;$$

$$w_3 = 0,4307.$$

Относительная близость альтернатив к идеальному решению согласно TOPSIS определяется следующим образом:

$$R_1 = 0,7580;$$

$$R_2 = 0,3876;$$

$$R_3 = 0,5233.$$

Таким образом, оптимальной альтернативой по методу TOPSIS оказалась Y_1 : $Y_1 > Y_3 > Y_2$. Этот результат совпадает с предлагаемым подходом, что подтверждает его обоснованность. Однако между этими методами есть определенные различия. В [18] для определения весов атрибутов использовался метод максимизации отклонения, согласно которому атрибуту с большим значением отклонения среди альтернатив будет присвоен больший вес. Поэтому для получения объективного веса атрибутов их необходимо преобразовать в безразмерную шкалу. Кроме того, предлагаемый метод учитывает отклонения ЛПР от рациональности, в отличие от нечеткого метода TOPSIS.

По сравнению с существующими методами предлагаемый подход к принятию решений в условиях чрезвычайной ситуации имеет следующие особенности:

- ◆ расширяются возможности для определения весов критериев принятия решений, когда критерии имеют различную шкалу;
- ◆ метод учитывает психологию ЛПР, в отличие от известных подходов, предполагающих рациональность решений ЛПР;
- ◆ по сравнению с теорией проспектов метод не требует субъективной оценки уровня ожиданий, использует меньшее количество параметров, что расширяет область его применения.

Заключение. В современном мире чрезвычайные события происходят все чаще в связи с активизацией человеческой деятельности и экономического развития, что серьезно угрожает жизни и имуществу людей. Являясь важной частью управления чрезвычайными ситуациями, принятие экстренных решений играет важную роль в купировании их последствий и имеет большую общественную значимость [19–21]. В этой статье предлагается подход, позволяющий оценить полезность альтернативных решений с учетом колебаний ЛПР, определить веса критериев разной размерности для принятия экстренных решений при возникновении чрезвычайной ситуации в условиях неопределенности и риска.

Отмечается, что психологические особенности ЛПР должны быть интегрированы в анализ при реальном процессе принятия решений. С этой целью предлагается нечеткий метод принятия экстренных решений, основанный на теории сожаления и учитывающий колебания ЛПР. Построена математическая модель для определения весов атрибутов с различными шкалами измерений, подход к измерению и расчету степени групповой удовлетворенности, что делает предлагаемый метод применимым к реальным проблемам принятия решений.

Предложенный метод также имеет некоторые ограничения: требуются определенные вычислительные затраты при большом количестве альтернативных решений и характеризующих их атрибутов. Однако это ограничение преодолевается при использовании популярного программного обеспечения, такого как MATLAB.

Интересной представляется возможность в будущем применить предлагаемый метод для задач оценки риска при принятии решений в условиях нечеткой информации, если значения атрибутов являются случайными величинами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Bozhenyuk A.V., Rodzin S.I., Rodzina L.S.* Multi-Criteria group decision-making: a fuzzy algorithm for emergency evacuation tasks // *Proc. Int. Russian Automation Conf. (RusAutoCon)*. – Publ. IEEE, 2023. – P. 214-218.
2. *Liu Y., Fan Z., Zhang Y.* Risk decision analysis in emergency response: a method based on cumulative prospect theory // *Computers and Operations Research*. – 2014. – Vol. 42. – P. 75-82.
3. *Wang L., Zhang Z., Wang Y.* A prospect theory-based interval dynamic reference point method for emergency decision making // *Expert Systems with Applications*. – 2015. – Vol. 42, No. 23. – P. 9379-9388.
4. *Bleichrodt H., Cillo A., Diecidue E.* A quantitative measurement of regret theory // *Management Science*. – 2010. – Vol. 56, No. 1. – P. 161-175.
5. *Zhang S., Zhu J., Liu X., Chen Y.* Regret theory-based group decision-making with multidimensional preference and incomplete weight information // *Information Fusion*. – 2016. – Vol. 31. – P. 1-13.
6. *Zhou H., Wang J., Zhang H.* Grey stochastic multicriteria decision-making based on regret theory and TOPSIS // *Int. Jour. of Machine Learning and Cybernetics*. – 2017. – Vol. 8, No. 2. – P. 651-664.
7. *Torra V.* Hesitant fuzzy sets // *Int. Jour. of Intelligent Systems*. – 2010. – Vol. 25. – P. 529-539.
8. *Zhang Z., et al.* A hesitant group emergency decision making method based on prospect theory // *Complex & Intelligent Systems*. – 2017. – Vol. 3, No. 3. – P. 177-187.
9. *Xia M., Xu Z.* Hesitant fuzzy information aggregation in decision making // *Int. Jour. of Approximate Reasoning*. – 2011. – Vol. 52, No. 3. – P. 395-407.
10. *Loomes G., Sugden R.* Regret theory: an alternative theory of rational choice under uncertainty // *Economic Journal*. – 1982. – Vol. 92, No. 368. – P. 805-824.
11. *Родзин С.И., Боженюк А.В., Кравченко Ю.А., Родзина О.Н.* Методы нечеткого многокритериального группового принятия решений для задач эвакуации при чрезвычайных ситуациях // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2023. – № 2. – С. 186-200.
12. *Герасименко Е.М., Курейчик В.В., Родзин С.И., Кухаренко А.П.* Применение нечеткой логики для принятия решений об эвакуации при наводнении // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2022. – № 4. – С. 15-29.
13. *Герасименко Е.М., Кравченко Д.Ю., Кравченко Ю.А., Курейчик В.В., Кулиев Э.В., Родзин С.И.* Модифицированный биоинспирированный метод поддержки принятия решений по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций // *Информационные технологии*. – 2023. – Т. 29, № 8. – С. 423-436.
14. *Zhao H., Yan A.J., Wang P.* On improving reliability of case-based reasoning classifier // *Acta Automatica Sinica*. – 2014. – Vol. 40, No. 9. – P. 2029-2036.
15. *Tversky A., Kahneman D.* Advances in prospect theory: cumulative representation of uncertainty // *Journal of Risk and Uncertainty*. – 1992. – Vol. 5, No. 4. – P. 297-323.
16. *Liu X., Wang Z., Zhang S.* A new methodology for hesitant fuzzy Emergency decision making with unknown weight information // *Complexity*. – 2018. – 12 p. – <https://doi.org/10.1155/2018/5145348>.
17. *Humphrey S.J.* Feedback-conditional regret theory and testing regret-aversion in risky choice // *Journal of Economic Psychology*. – 2004. – Vol. 25, No. 6. – P. 839-857.
18. *Xu Z., Zhang X.* Hesitant fuzzy multi-attribute decision making based on TOPSIS with incomplete weight information // *Knowledge-Based Syst.* – Vol. 52, No. 6. – P. 53-64.
19. *Bozhenyuk A.V., Gerasimenko E.M., Rodzin S.I.* Evacuation Centers Choice by Intuitionistic Fuzzy Graph // *Proc. Int. Conf. on Hybrid Intelligent Systems on the WWW (HIS), LNNS*. – 2023. – Vol. 647. – P. 391-400.
20. *Кравченко Д.Ю., Кравченко Ю.А., Кулиев Э.В., Родзин С.И.* Алгоритм выявления предпосылок возникновения чрезвычайных ситуаций на основе правил "ЕСЛИ-ТО" // *Информатизация и связь*. – 2023. – № 2. – С. 11-17.
21. *Bozhenyuk A.V., Gerasimenko E.M., Rodzin S.I.* Finding the Optimal Placement of Evacuation Centers by Antibase Set of Intuitionistic Fuzzy Graph // *Int. Jour. of Computer Information Systems and Industrial Management Applications*. – 2023. – Vol. 15. – P. 13-22.

REFERENCES

1. *Bozhenyuk A.V., Rodzin S.I., Rodzina L.S.* Multi-Criteria group decision-making: a fuzzy algorithm for emergency evacuation tasks, *Proc. Int. Russian Automation Conf. (RusAutoCon)*. Publ. IEEE, 2023, pp. 214-218.
2. *Liu Y., Fan Z., Zhang Y.* Risk decision analysis in emergency response: a method based on cumulative prospect theory, *Computers and Operations Research*, 2014, Vol. 42, pp. 75-82.
3. *Wang L., Zhang Z., Wang Y.* A prospect theory-based interval dynamic reference point method for emergency decision making, *Expert Systems with Applications*, 2015, Vol. 42, No. 23, pp. 9379-9388.

4. Bleichrodt H., Cillo A., Diecidue E. A quantitative measurement of regret theory, *Management Science*, 2010, Vol. 56, No. 1, pp. 161-175.
5. Zhang S., Zhu J., Liu X., Chen Y. Regret theory-based group decision-making with multidimensional preference and incomplete weight information, *Information Fusion*, 2016, Vol. 31, pp. 1-13.
6. Zhou H., Wang J., Zhang H. Grey stochastic multicriteria decision-making based on regret theory and TOPSIS, *Int. Jour. of Machine Learning and Cybernetics*, 2017, Vol. 8, No. 2, pp. 651-664.
7. Torra V. Hesitant fuzzy sets, *Int. Jour. of Intelligent Systems*, 2010, Vol. 25, pp. 529-539.
8. Zhang Z., et al. A hesitant group emergency decision making method based on prospect theory, *Complex & Intelligent Systems*, 2017, Vol. 3, No. 3, pp. 177-187.
9. Xia M., Xu Z. Hesitant fuzzy information aggregation in decision making, *Int. Jour. of Approximate Reasoning*, 2011, Vol. 52, No. 3, pp. 395-407.
10. Loomes G., Sugden R. Regret theory: an alternative theory of rational choice under uncertainty, *Economic Journal*, 1982, Vol. 92, No. 368, pp. 805-824.
11. Rodzin S.I., Bozhenyuk A.V., Kravchenko Yu.A., Rodzina O.N. Metody nechetkogo mnogokriterial'nogo gruppovogo prinyatiya resheniy dlya zadach evakuatsii pri chrezvychaynykh situatsiyakh [Methods of fuzzy multi-criteria group decision-making for emergency evacuation tasks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 2, pp. 186-200.
12. Gerasimenko E.M., Kureychik V.V., Rodzin S.I., Kukhareenko A.P. Primenenie nechetkoy logiki dlya prinyatiya resheniy ob evakuatsii pri navodnenii [Using fuzzy logic to make decisions about flood evacuation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 4, pp. 15-29.
13. Gerasimenko E.M., Kravchenko D.Yu., Kravchenko Yu.A., Kureychik V.V., Kuliev E.V., Rodzin S.I. Modifitsirovannyi bioinspirirovannyi metod podderzhki prinyatiya resheniy po preduprezhdeniyu i likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy [A modified bioinspired method of decision support for the prevention and elimination of consequences of emergency situations], *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technology], 2023, Vol. 29, No. 8, pp. 423-436.
14. Zhao H., Yan A.J., Wang P. On improving reliability of case-based reasoning classifier, *Acta Automatica Sinica*, 2014, Vol. 40, No. 9, pp. 2029-2036.
15. Tversky A., Kahneman D. Advances in prospect theory: cumulative representation of uncertainty, *Journal of Risk and Uncertainty*, 1992, Vol. 5, No. 4, pp. 297-323.
16. Liu X., Wang Z., Zhang S. A new methodology for hesitant fuzzy Emergency decision making with unknown weight information, *Complexity*, 2018, 12 p. Available at: <https://doi.org/10.1155/2018/5145348>.
17. Humphrey S.J. Feedback-conditional regret theory and testing regret-aversion in risky choice, *Journal of Economic Psychology*, 2004, Vol. 25, No. 6, pp. 839-857.
18. Xu Z., Zhang X. Hesitant fuzzy multi-attribute decision making based on TOPSIS with incomplete weight information, *Knowledge-Based Syst.*, Vol. 52, No. 6, pp. 53-64.
19. Bozhenyuk A.V., Gerasimenko E.M., Rodzin S.I. Evacuation Centers Choice by Intuitionistic Fuzzy Graph, *Proc. Int. Conf. on Hybrid Intelligent Systems on the WWW (HIS), LNNS*, 2023, Vol. 647, pp. 391-400.
20. Kravchenko D.Yu., Kravchenko Yu.A., Kuliev E.V., Rodzin S.I. Algoritm vyyavleniya predposylok vzniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy na osnove pravil "ESLI-TO" [An algorithm for identifying the prerequisites for emergency situations based on the "IF-THEN" rules], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2023, No. 2, pp. 11-17.
21. Bozhenyuk A.V., Gerasimenko E.M., Rodzin S.I. Finding the Optimal Placement of Evacuation Centers by Antibase Set of Intuitionistic Fuzzy Graph, *Int. Jour. of Computer Information Systems and Industrial Management Applications*, 2023, Vol. 15, pp. 13-22.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.М. Ковалев.

Родзин Сергей Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: srodzin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; профессор.

Боженюк Александр Витальевич – e-mail: avbozhenyuk@sfedu.ru; кафедра информационно-аналитических систем безопасности; профессор.

Нужнов Евгений Владимирович – e-mail: evnuzhnov@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; профессор.

Rodzin Sergey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: srodzin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Software Engineering; professor.

Bozhenyuk Alexander Vitalyevich – e-mail: avb002@yandex.ru; the Department of Information and Analytical Security System; professor.

Nuzhnov Evgeny Vladimirovich – e-mail: evnuzhnov@sfedu.ru; the Department of Computer-Aided Design Systems; professor.

УДК 004.932.4

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-158-168

К.О. Север, К.Н. Алексеев, И.И. Турулин**РЕАЛИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОГО РАЗДЕЛИМОГО ДВУМЕРНОГО ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА НА ПЛИС**

В современных системах видеонаблюдения, в которых широко распространено использование технологий компьютерного зрения, наиболее важной информацией на изображении являются данные о контурах объектов и выделение мелких деталей. К системам предъявляются жесткие требования, такие как: высокая скорость обработки информации с большого количества камер одновременно, работа в условиях плохого освещения объекта и под воздействием внешних шумов (электромагнитных полей, коротких помех от высоковольтных линий передач). Поэтому совершенствование методов обработки изображения с применением устройств распараллеливания вычислений и построения многопоточной системы является актуальной задачей. В данной работе для обработки изображения на ПЛИС разработан и смоделирован анизотропный фильтр высоких частот 3×3 . Описан алгоритм его построения в виде разделимого векторного представления. Дано подробное описание о разработке эффективного разделимого двумерного цифрового фильтра для повышения резкости и выделение границ объектов RGB-изображений. Фильтр основан на синтезе предложенного анизотропного фильтра высоких частот 3×3 и градиентного фильтра Собеля. Спроектирована соответствующая структурная схема фильтра. По результатам обработки искаженного изображения можно сделать вывод о том, что разработанный фильтр обладает свойством более равномерной детализации и выделения объектов на изображении и менее подвержен гауссовскому шуму по сравнению с градиентным фильтром Собеля и фильтром высоких частот Лапласа. Разработана схема конвейера фильтра на ПЛИС для обработки одной плоскости RGB изображения. За счет использования разделимых фильтров предложенная реализация практически в 2 раза оптимальнее по числу выполняемых операций сложения/вычитания, чем прямая реализация градиентного фильтра Собеля 3×3 и анизотропного фильтра высоких частот 3×3 .

Обработка изображений; двумерные цифровые фильтры; фильтр высоких частот; фильтр Собеля; ПЛИС; резкость.

К.O. Sever, K.N. Alekseev, I.I. Turulin**IMPLEMENTATION OF AN EFFICIENT SEPARABLE VECTOR DIGITAL FILTER ON FPGA**

In modern video surveillance systems, in which the use of computer vision technology is widespread, the most important information in the image is data on the contours of objects and the highlighting of small details. The systems are subject to stringent requirements, such as: high speed of processing information from a large number of cameras simultaneously, operation in conditions of poor lighting of the object and under the influence of external noise (electromagnetic fields, short interference from high-voltage transmission lines). Therefore, improving image processing methods using parallel computing devices and building a multi-threaded system is an urgent task. In this work, a 3×3 anisotropic high-pass filter is designed and simulated for image processing on an FPGA. An algorithm for its construction in the form of a separable vector representation is described. A detailed description is given of the development of an effective separable two-dimensional digital filter for sharpening and highlighting the boundaries of objects in RGB images. The filter is based on the synthesis of the proposed 3×3 anisotropic high-pass filter and the Sobel gradient filter. The corresponding block diagram of the filter has been designed. Based on the results of processing the distorted image, we can conclude that the developed filter has the property of more uniform detailing and high-

lighting of objects in the image and is less susceptible to Gaussian noise compared to the Sobel gradient filter and the Laplace high-pass filter. A filter pipeline circuit has been developed on an FPGA for processing one plane of an RGB image. Due to the use of separable filters, the proposed implementation is almost 2 times more optimal in terms of the number of addition/subtraction operations performed than the direct implementation of a 3x3 Sobel gradient filter and a 3x3 anisotropic high-pass filter.

Image processing; two-dimensional digital filters; high pass filter; Sobel filter; FPGA; sharpness.

Введение. В системах видеонаблюдения видеоизображение играет ключевую роль в передаче информации. Одной из актуальных и требующих больших вычислительных ресурсов задач является извлечение данных из видеоизображения с использованием технологии компьютерного зрения в условиях плохого освещения объекта или воздействия внешних шумов и других факторов [1].

Применение системы компьютерного зрения в различных областях [2, 3], таких, как промышленность, робототехника, авионика и интеллектуальные видеосистемы для безопасности города, позволяет решать ряд задач, например:

- ◆ автоматическая проверка детали или конечного продукта на наличие дефектов для контроля качества;
- ◆ осуществление слежения за ношением средств индивидуальной защиты работниками на опасных производствах;
- ◆ обеспечение автономной навигации без вмешательства человека для различных видов транспортных средств – воздушных, наземных и подводных;
- ◆ помощь оператору при управлении в условиях плохой видимости;
- ◆ выделение границ транспортных объектов на изображениях, включая номерные знаки для обнаружения, распознавания и отслеживания объектов в реальном времени [4].

Также примером применения технологии компьютерного зрения являются телевизионные системы наблюдения (ТВСН) [5]. ТВСН используются для контроля и оценки ситуации в зонах, опасных для присутствия человека (например, реакторный зал атомной электростанции) [6] или для охраны объектов (в любых условиях). Такие системы обеспечивают надежный мониторинг вне зависимости от погоды, освещенности, времени суток и других помех и могут работать на расстоянии до 25–30 км.

Для всех вышеописанных систем, которые определяют объекты на цифровых изображениях, наиболее важной информацией являются данные о контурах объектов [7] и выделение мелких деталей на изображении.

Одновременно с этим немаловажным является удовлетворение требований к высокой скорости обработки информации, а также малого размера, веса и энергопотребления устройства. Так как в ТВСН используется обработка данных с большого количества камер одновременно [8], применение ПЛИС для распараллеливания вычислений и построения многопоточной системы является наилучшим решением.

ПЛИС – это программируемая логическая интегральная схема, специальный класс устройств, которые позволяют разработчику проектировать вычислительное устройство под любой алгоритм, учитывая его особенности. Такая архитектура обеспечивает лучшее решение задачи за счет распараллеливания вычислений [9]. Гибкость ПЛИС позволяет разработчику создать многопоточную систему обработки информации, что делает ПЛИС оптимальным выбором для задач обработки изображений [10, 11].

В данной работе предлагаются:

- ◆ анизотропный фильтр высоких частот 3x3 для эффективной реализации на ПЛИС;
- ◆ разделимый двумерный цифровой фильтр (РДЦФ) для построения на ПЛИС, повышающий резкость и выделяющий границы объектов. Алгоритм данного фильтра построен на синтезе предложенного анизотропного фильтра высоких частот 3x3 и градиентного фильтра Собеля (рис. 1);
- ◆ эффективная (в части вычислительной сложности) реализация разработанного РДЦФ на ПЛИС.

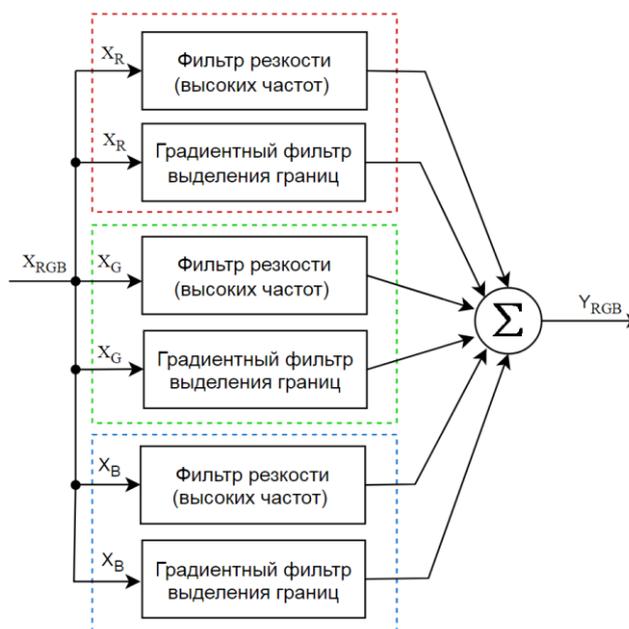


Рис. 1. Структурная схема РДЦФ для повышения резкости и выделения границ объектов при обработке RGB-изображений

Цель работы: повышение резкости и выделение границ объектов при обработке RGB-изображений.

Задачи работы:

1. Для исходного RGB-изображения необходимо смоделировать фильтр размытия, матрица которого заполняется по нормальному (гауссовому) закону.
2. Разработать и смоделировать анизотропный фильтр высоких частот 3×3 и произвести обработку размытого изображения.
3. Смоделировать градиентный фильтр Собеля и произвести обработку размытого изображения.
4. Разработать и смоделировать разделимый двумерный цифровой фильтр (РДЦФ) и произвести обработку размытого изображения.
5. Для оценки качества фильтрации – сравнить градиентный фильтр Собеля, разработанный анизотропный фильтр высоких частот 3×3 и разработанный РДЦФ.
6. Разработать эффективную реализацию созданного РДЦФ на ПЛИС.

Градиентный фильтр выделения границ. Одной из ключевых задач цифровой обработки изображений является определение объектов, а именно – выделение их контура. Контур на цифровых изображениях – это границы объектов или линий, на которых происходит резкий перепад яркости изображения. Они представляют собой набор точек, где яркость изображения резко меняется.

Переход изображения с полным обзором к изображениям контуров основных объектов значительно упрощает процесс обработки данных, так как сильно сокращается объем обрабатываемой информации [12].

Один из методов выделения контуров на изображении – это вычисление градиента изображения с использованием различных матриц свертки, за которым следует сравнение значений градиента в каждой точке изображения с определенным порогом. Эти методы основаны на свойстве разрывности сигнала яркости. Они выделяют резкие изменения на изображении, при этом сглаженные изменения подавляются. Такие методы выделения пикселей изображения называют детекторами краев [13].

Оптимальным способом обнаружения разрывов является обработка изображения с использованием скользящей маски (пространственная фильтрация).

Градиентный фильтр выделения границ относится к первой производной дискретной функции. В обработке изображений первые производные реализуются через модуль градиента. Для функции $f(x, y)$ градиент f в точке (x, y) определяется как двумерный вектор-столбец [14]:

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \approx |G_x| + |G_y| \quad (1)$$

В качестве масок для определения составляющих градиента используются операторы Робертса, Превитта, Собеля и Щарра с размером 3×3 (рис. 2). Основное требование к каждой маске градиентного фильтра заключается в том, чтобы сумма ее коэффициентов была всегда равна нулю. Это гарантирует нулевой отклик операторов первой производной на областях изображения с фиксированным уровнем яркости.

0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	0	+1
0	-1	0	0	0	-1	0	0	0	-1	0	+1
0	0	+1	0	+1	0	+1	+1	+1	-1	0	+1
а						б					
-1	-2	-1	-1	0	+1	-3	-10	-3	-3	0	+3
0	0	0	-2	0	+2	0	0	0	-10	0	+10
+1	+2	+1	-1	0	+1	+3	+10	+3	-3	0	+3
в						г					

Рис. 2. Горизонтальные и вертикальные операторы: а – Робертса; б – Превитта; в – Собеля; г – Щарра [15]

Для определения дискретного приближения уравнения (1) представим маску фильтрации 3×3 как область изображения с коэффициентами $z_1 \dots z_9$ (рис. 3).

z_1	z_2	z_3
z_4	z_5	z_6
z_7	z_8	z_9

Рис. 3. Область изображения размером 3×3 элемента

Тогда реализация градиентного оператора Собеля (рис. 2,в) описывается следующим выражением:

$$\nabla f \approx |z_7 + 2z_8 + z_9| - |z_1 + 2z_2 + z_3| + |z_3 + 2z_6 + z_9| - |z_1 + 2z_4 + z_7| \quad (2)$$

Но если разделить горизонтальные и вертикальные операторы 3×3 (рис. 1,в) на отдельные вертикальные (1×3) и горизонтальные (3×1) векторы (рис. 4), то это позволит сократить количество операций умножения при реализации фильтра на ПЛИС, заменив их на арифметические операций сложения/вычитания [16].

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & -2 & -1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline +1 & +2 & +1 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline -1 \\ \hline 0 \\ \hline 1 \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline \end{array}$$

а

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 0 & +1 \\ \hline -2 & 0 & +2 \\ \hline -1 & 0 & +1 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline 2 \\ \hline 1 \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}$$

б

Рис. 4. Реализация разделимого фильтра Собеля для оператора: а – горизонтального; б – вертикального

После анализа работы всех представленных операторов (рис. 2) сделан вывод, что наилучшим градиентным фильтром для реализации на ПЛИС является оператор Собеля, так как он обладает следующими преимуществами:

- ♦ весовые коэффициенты со значением 2 данного фильтра позволяют подчеркнуть более детально контуры объектов;
- ♦ операция свертки кратна степени числа 2, что позволяет заменить операцию умножения на побитовый сдвиг влево;
- ♦ возможность разделения оператора 3×3 (рис. 2,в) на отдельные вертикальные (1×3) и горизонтальные (3×1) векторы (рис. 5).

Фильтр резкости (высоких частот). Основная задача улучшения резкости заключается в выделении мелких деталей на изображении и улучшении тех, что могли быть размыты (расфокусированы) по причине ошибок или недостатков самого процесса регистрации данных [17].

Расфокусирование изображения происходит за счет потери деталей и резкости из-за смещения значений пикселей вблизи друг от друга, усреднения значений пикселей по окрестности или при размытии (по нормальному гауссовому закону). Для увеличения резкости изображения можно использовать методы обратной обработки – применение операций пространственного дифференцирования [18].

Пространственное дифференцирование изображения позволяет увеличить контраст и четкость границ объектов, так как оператор дифференцирования выделяет перепады яркости в изображении. Однако такие фильтры также могут увеличить шумы на изображении, поскольку даже незначительные изменения яркости в пикселях будут усилены.

Эффективность оператора дифференцирования в точке изображения зависит от степени различия значений пикселей в данной точке. Чем больше различие в значениях, тем сильнее будет отклик оператора дифференцирования. Именно поэтому дифференцирование изображения может как улучшить резкость границ объектов, так и усилить шумы, присутствующие на изображении [19–21].

Фильтры резкости (высоких частот) относятся к операторам второй производной. Определяются они как разность соседних значений первой производной. Простейшим оператором, основанным на данных производных, является оператор Лапласа – двумерный лапласиан, дискретное представление которого имеет следующий вид:

$$\nabla^2 f = [f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1)] - 4f(x, y) \quad (3)$$

Маска фильтра дискретного представления двумерного лапласиана представлена на рис. 5.

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

Рис. 5. Область изображения размером 3×3 элемента

Одним из преимуществ двумерного лапласиана является то, что он представляет собой изотропный фильтр, отклик которого не зависит от направления неоднородностей на изображении [22]. Также он обладает свойством инвариантности к повороту изображения, что означает, что при повороте изображения и последующем применении фильтра результат будет точно таким же, как и после применения фильтра до поворота.

Но реализовать векторное разделение изотропного фильтра невозможно, поэтому разработан и предложен анизотропный фильтр высоких частот 3х3, представленный на рис. 6.

-1	-2	-1
+2	+4	+2
-1	-2	-1

а

-1	+2	-1
-2	+4	-2
-1	+2	-1

б

Рис. 6. Оператор фильтра высоких частот 3х3: а – вертикальный, б – горизонтальный

Для создания многопоточной обработки изображения в ПЛИС и уменьшения числа операций умножения, вертикальное и горизонтальное ядро фильтра высоких частот 3х3 разделяются на отдельные вертикальные (1х3) и горизонтальные (3х1) векторы.

-1	-2	-1
+2	+4	+2
-1	-2	-1

а

1
-2
1

x

-1	-2	-1
----	----	----

-1	+2	-1
-2	+4	-2
-1	+2	-1

б

1
2
1

x

-1	2	-1
----	---	----

Рис. 7. Реализация разделимого анизотропного фильтра высоких частот 3х3 для оператора: а – горизонтального; б – вертикального

Моделирование и оценка качества фильтрации. Для моделирования фильтра размытия и последующей фильтрации используем исходное изображения «Автомобильная трасса».

Двумерный фильтр размытия, матрица которого заполняется по нормальному (гауссовскому) закону [23], выражается формулой:

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

где x – расстояние от центра по горизонтальной оси;

y – расстояние от центра по вертикальной оси;

σ – среднеквадратичное отклонение распределения Гаусса.

Исходное изображение «Автомостраль» обрабатываем фильтром размытия с величиной среднеквадратичного отклонения распределения $\sigma=1$. Размытое изображение (рис. 8,а) обрабатываем тремя различными фильтрами: анизотропным фильтром высоких частот 3×3 , градиентным оператором Собеля и РВЦФ. Результаты фильтраций искаженного изображения «Автомостраль» представлены на рис. 8.

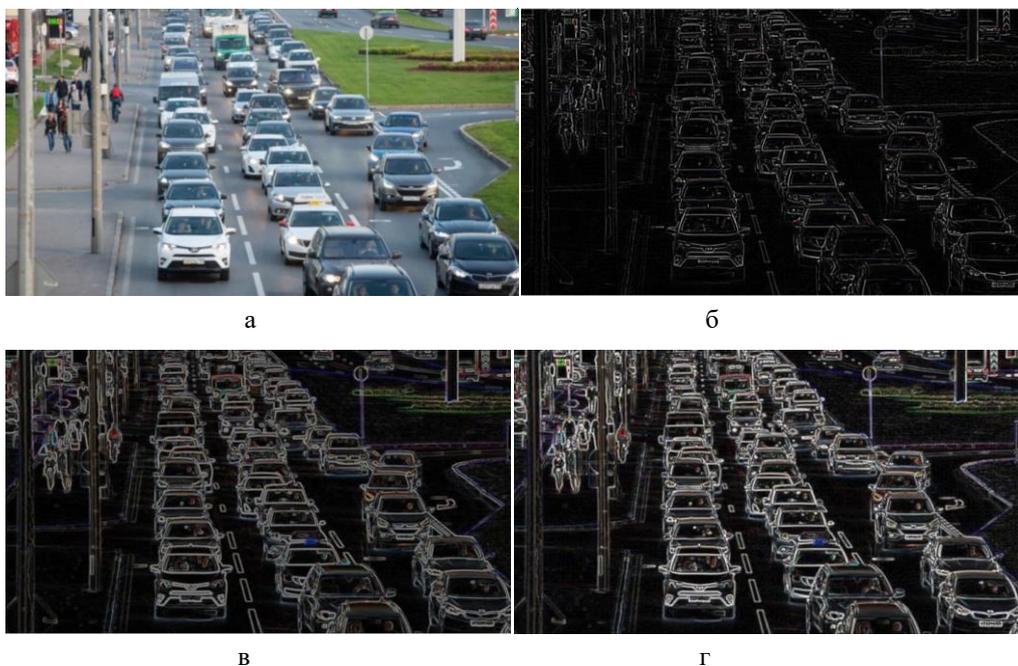


Рис. 8. Изображение: а – с фильтром размытия $\sigma = 1$; б – обработанное анизотропным фильтром высоких частот 3×3 ; в – обработанное градиентным оператором Собеля; г – обработанное РВЦФ

Реализация РДЦФ на ПЛИС. Алгоритм РДЦФ построен на синтезе предложенного векторного разделимого анизотропного фильтра высоких частот (рис. 7) и векторного разделимого фильтра Собеля (рис. 4).

Наиболее оптимальной при реализации на ПЛИС является конвейерная схема, позволяющая обрабатывать данные последовательно в темпе их поступления. Схема конвейера РДЦФ для одного канала представлена на рис. 9.

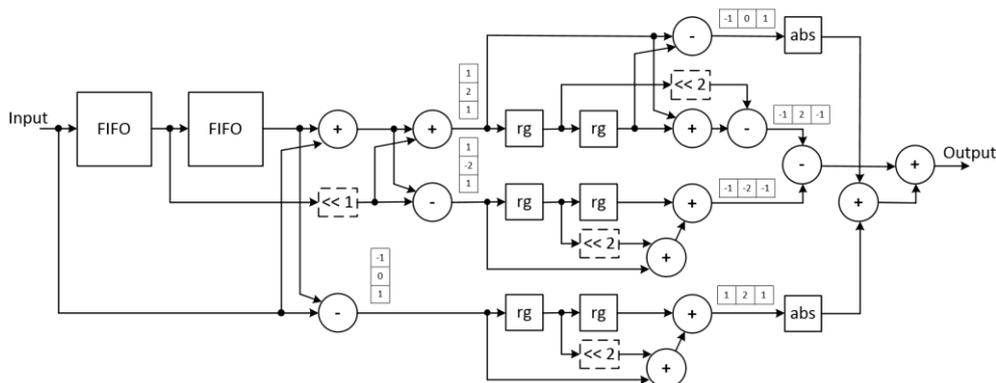


Рис. 9. Схема конвейера РДЦФ для одной плоскости RGB изображения

Число каналов данных является критическим ресурсом при реализации параллельных вычислений на ПЛИС, поэтому было принято решение выполнять буферизацию двух строк в блоках FIFO (First In, First Out – первым пришел – первым ушел), использующих внутреннюю память ПЛИС, что позволит имитировать поступление данных в виде плавающего окна размера 3×1 [24]. В таком режиме используется всего два канала данных: один входной и один выходной.

Предполагается, что изображение поступает на вход схемы *Input* последовательно, пиксель за пикселем.

Для сокращения аппаратных затрат было оптимизировано число операций умножения (по минимуму): так, умножение на 2 было заменено на операцию логического сдвига влево на 1 бит, а операция умножения на 4 – логический сдвиг влево на 2 бита. Также оптимизированы по минимуму одинаковые операции, выполняющие умножение одних и тех же исходных данных на одни и те же коэффициенты.

Блоки *rg* представляют собой регистры для синхронизации потоков данных. Операции возведения в квадрат и вычисления квадратного корня (1) являются вычислительно-трудоемкими и требуют сравнительно много аппаратного ресурса ПЛИС, поэтому вместо вычисления корня из суммы квадратов выполняется операция взятия модуля числа *abs* (только для фильтра Собеля) и суммирование результатов всех вычислений. Такой подход, хотя и обладает некоторой погрешностью вычислений [25], позволяет значительно уменьшить используемый аппаратный ресурс ПЛИС, за счет чего можно увеличить степень распараллеливания фильтра, а значит и результирующую производительность.

Схема была реализована в ПЛИС Xilinx Kintex UltraScale KU095 [26]. Ввиду относительной простоты конвейерной схемы была достигнута тактовая частота ее работы 500 МГц. Используемые аппаратные ресурсы ПЛИС при реализации схемы для одного и трех каналов приведены в табл. 1. Для ускорения фильтрации имеется возможность распараллелить схему по данным, причем производительность системы будет увеличиваться линейно.

Таблица 1

Используемые аппаратные ресурсы ПЛИС при реализации схемы

Использовано ресурсов	BRAM	LUT	FF
на 1 канал	2	146	226
на 3 канала	6	438	678

При прямой конвейерной реализации градиентного фильтра Собеля 3×3 число суммирований равно 11 для каждого канала входного изображения. Прямая конвейерная реализация анизотропного фильтра высоких частот 3×3 составляет 17 операций сложения. Итого, суммарно для прямой реализации РДЦФ требуется 28 операций сложения.

На конвейерную реализацию разделимого фильтра Собеля (1×3 и 3×1) необходимо 7 операций суммирования; анизотропного фильтра высоких частот 3×3 – 9 операций суммирования. Итого, для разделимой реализации РДЦФ требуется 17 операций сложения. Однако после оптимизации одинаковых сложений при параллельной обработке всех вертикальных компонент фильтра удалось оптимизировать РДЦФ до 14 операций сложения/вычитания. Таким образом, ввиду использования разделимых фильтров предложенная реализация практически в 2 раза оптимальнее по числу выполняемых операций сложения/вычитания.

Заключение. В результате в данной работе был разработан и смоделирован анизотропный фильтр высоких частот 3×3 . Описан алгоритм его построения в виде разделимого векторного представления.

Разработан и смоделирован разделимый двумерный цифровой фильтр (РДЦФ) для повышения резкости и выделения границ объектов. Разработанный фильтр детально подчеркивает объекты изображения и менее подвержен гауссовскому шуму по сравнению с градиентным фильтром Собеля и фильтром высоких частот Лапласа. Возможности фильтра продемонстрированы на примере тестового искаженного изображения «Автоматгистраль».

Разработана схема конвейера РДЦФ на ПЛИС. За счет использования разделимых фильтров (рис. 4 и 7) предложенная реализация практически в 2 раза оптимальнее по числу выполняемых операций сложения/вычитания, чем прямая реализация градиентного фильтра Собеля 3x3 и анизотропного фильтра высоких частот 3x3.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Краснящих А.В.* Обработка оптических изображений. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – 129 с.
2. *Кудрявцев Н.Г., Фролов И.Н.* Практика применения компьютерного зрения и элементов машинного обучения в учебных проектах: учеб. пособие. – Горно-Алтайск : БиЦ ГАГУ, 2022. – 180 с.
3. *Bradski G., Kaehler A.* Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library. – O'ReillyMedia, 2008. – 556 p.
4. *Дзюба В.Г., Дзюба А.В.* Алгоритм распознавания предупреждающих дорожных знаков // Электроника и связь. – 2009. – № 6. – С. 13-17.
5. *Алексеев С.А., Волхонский В.В., Суханов А.В.* Телевизионные системы наблюдения. Основы проектирования. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 126 с.
6. *Домьяновски В.* Библия видеонаблюдения. Цифровые и сетевые технологии. – 2-е изд. – М.: Ай-Эс-Пресс, 2006. – 480 с.
7. *Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю.* Компьютерная обработка и распознавание изображений: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.
8. *Волхонский В. В.* Телевизионные системы наблюдения. – 2-е изд., доп. и перераб. – СПб.: Экополис и культура, 2005. – 168 с.
9. *Кистрин А.В., Костров Б.В., Никифоров М.Б., Устюков Д.И.* Проектирование цифровых устройств: учебник. – М.: Курс: ИНФРА-М, 2017. – 352 с.
10. *Chaithra.N.M., Reddy K.V.R.* Implementation of Canny Edge Detection Algorithm on FPGA and displaying Image through VGA Interface // International Journal of Engineering and Advanced Technology. – 2013. – Vol. 2, Issue-6. – P. 243-247.
11. *Escobar F.A., Chang X., Valderrama C.* Suitability Analysis of FPGAs for Heterogeneous Platforms in HPC // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. – 2016. – Vol. 27, No. 2. – P. 600-612.
12. *Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю.* Компьютерная обработка и распознавание изображений : учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.
13. *Старовойтов В.В., Голуб Ю.И.* Цифровые изображения: от получения до обработки. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2014. – 202 с.
14. *Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю.* Компьютерная обработка и распознавание изображений. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.
15. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
16. *Martin Králik, Libor Ladányi.* Canny edge detector algorithm optimization using 2d spatial separable convolution // Acta Electrotechnica et Informatica. – 2021. – Vol. 21, No. 4. – P. 36-43.
17. *Приоров А.Л., Апальков И.В., Хрящев В.В.* Цифровая обработка изображений: учеб. пособие. – Ярославль: ЯрГУ, 2007. – 235 с.
18. *Яне Б.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.
19. *Грузман И.С., Киричук В.С. и др.* Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.
20. *Шапиро Л., Стокман Дж.* Компьютерное зрение. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
21. *Селянкин В.В., Скороход С.В.* Анализ и обработка изображений в задачах компьютерного зрения: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – 82 с.
22. *Мартыанова А.В.* Использование изотропных фильтров в обработке изображений // Информация: передача, обработка, восприятие. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – С. 34-41.
23. *Шлезингер М.И.* Математические средства обработки изображений. – К.: Наукова думка, 1989. – 200 с.
24. *Donald G. Bailey.* Design for Embedded Image Processing on FPGAs. – John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2011 – 482 p.
25. *Zhang Y.Y., Wang P.S.P.* A modified parallel thinning algorithm // Intern. Conf. on Pattern Recognition, Rome, Italy, 14–17 Nov. 1988. – Rome, 1988. – P. 1023-1025.
26. Архитектура UltraScale и техническое описание продукта: обзор. – Режим доступа: <https://docs.amd.com/v/u/en-US/ds890-ultrascale-overview> (дата обращения: 15.05.2024).

REFERENCES

1. *Krasnyashchikh A.V.* Obrabotka opticheskikh izobrazheniy [Optical image processing]. Saint Petersburg: NIU ITMO, 2012, 129 p.
2. *Kudryavtsev N.G., Frolov I.N.* Praktika primeneniya komp'yuternogo zreniya i elementov mashinnogo obucheniya v uchebnykh proektakh: ucheb. posobie [The practice of using computer vision and machine learning elements in educational projects: a tutorial]. Gorno-Altaysk : BITS GAGU, 2022, 180 p.
3. *Bradski G., Kaehler A.* Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library. O'ReillyMedia, 2008, 556 p.
4. *Dzyuba V.G., Dzyuba A.V.* Algoritm raspoznavaniya preduprezhdayushchikh dorozhnykh znakov [Algorithm for recognizing warning road signs], *Elektronika i svyaz'* [Electronics and Communications], 2009, No. 6, pp. 13-17.
5. *Alekseev S.A., Volkhonskiy V.V., Sukhanov A.V.* Televizionnye sistemy nablyudeniya. Osnovy proektirovaniya [Television surveillance systems. Basics of design]. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2015, 126 p.
6. *Dom'yanovski V.* Bibliya videonablyudeniya. Tsifrovye i setevye tekhnologii [The CCTV Bible. Digital and network technologies]. 2nd ed. Moscow: Ay-Es-Es-Press, 2006, 480 p.
7. *Fisenko V.T., Fisenko T.Yu.* Komp'yuternaya obrabotka i raspoznavanie izobrazheniy: ucheb. posobie [Computer processing and image recognition: textbook]. Saint Petersburg SPbGU ITMO, 2008, 192 p.
8. *Volkhonskiy V.V.* Televizionnye sistemy nablyudeniya [Television surveillance systems]. 2nd ed. Saint Petersburg: Ekopolis i kul'tura, 2005, 168 p.
9. *Kistrin A.V., Kostrov B.V., Nikiforov M.B., Ustyukov D.I.* Proektirovanie tsifrovyykh ustroystv: uchebnyk [Design of digital devices: textbook]. Moscow: Kurs: INFRA-M, 2017, 352 p.
10. *Chaithra.N.M., Reddy K.V.R.* Implementation of Canny Edge Detection Algorithm on FPGA and displaying Image through VGA Interface, *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2013, Vol. 2, Issue-6, pp. 243-247.
11. *Escobar F.A., Chang X., Valderrama C.* Suitability Analysis of FPGAs for Heterogeneous Platforms in HPC, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2016, Vol. 27, No. 2, pp. 600-612.
12. *Fisenko V.T., Fisenko T.Yu.* Komp'yuternaya obrabotka i raspoznavanie izobrazheniy: ucheb. posobie [Computer processing and image recognition: textbook]. Saint Petersburg: SPbGU ITMO, 2008, 192 p.
13. *Starovoytov V.V., Golub Yu.I.* Tsifrovye izobrazheniya: ot polucheniya do obrabotki [Digital images: from acquisition to processing]. Minsk: OIPI NAN Belarusi, 2014, 202 p.
14. *Fisenko V.T., Fisenko T.Yu.* Komp'yuternaya obrabotka i raspoznavanie izobrazheniy [Computer processing and image recognition]. Saint Petersburg: SPbGU ITMO, 2008, 192 p.
15. *Gonsales R., Vuds R.* Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing]. Moscow: Tekhnosfera, 2012, 1104 p.
16. *Martin Králik, Libor Ladányi.* Canny edge detector algorithm optimization using 2d spatial separable convolution, *Acta Electrotechnica et Informatica*, 2021, Vol. 21, No. 4, pp. 36-43.
17. *Priorov A.L., Apal'kov I.V., Khryashchev V.V.* Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy: ucheb. posobie [Digital image processing: tutorial]. Yaroslavl': YarGU, 2007, 235 p.
18. *Yane B.* Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing]. Moscow: Tekhnosfera, 2007, 584 p.
19. *Gruzman I.S., Kirichuk V.S. i dr.* Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v informatsionnykh sistemakh: ucheb. posobie [Digital image processing in information systems: a tutorial]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2002, 352 p.
20. *Shapiro L., Stokman Dzh.* Komp'yuternoe zrenie [Computer vision]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2006, 752 p.
21. *Selyankin V.V., Skorokhod S.V.* Analiz i obrabotka izobrazheniy v zadachakh komp'yuternogo zreniya: ucheb. posobie [Analysis and processing of images in computer vision tasks: a tutorial]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2015, 82 p.
22. *Mart'yanova A.V.* Ispol'zovanie izotropnykh fil'trov v obrabotke izobrazheniy [Using isotropic filters in image processing], *Informatsiya: peredacha, obrabotka, vospriyatie* [Information: transmission, processing, perception]. Ekaterinburg: UrFU, 2016, pp. 34-41.
23. *Shlezinger M.I.* Matematicheskie sredstva obrabotki izobrazheniy [Mathematical tools for image processing]. Kiev: Naukova dumka, 1989, 200 p.
24. *Donald G. Bailey.* Design for Embedded Image Processing on FPGAs. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2011, 482 p.
25. *Zhang Y.Y., Wang P.S.P.* A modified parallel thinning algorithm, *Intern. Conf. on Pattern Recognition, Rome, Italy, 14-17 Nov. 1988*. Rome, 1988, pp. 1023-1025.
26. Архитектура UltraScale i tekhnicheskoe opisanie produkta: obzor [UltraScale Architecture and Product Datasheet: Overview]. Available at: <https://docs.amd.com/v/u/en-US/ds890-ultrascale-overview> (accessed 15 May 2024).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

Север Константин Олегович – Южный федеральный университет; e-mail: sever@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Алексеев Кирилл Николаевич – e-mail: kalekseev@sfedu.ru; кафедра вычислительной техники; к.т.н., доцент.

Турулин Игорь Ильич – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

Sever Konstantin Olegovich – Southern Federal University; e-mail: sever@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering; post-graduate student.

Alekseev Kirill Nikolaevich – e-mail: kalekseev@sfedu.ru; the Department of Computer Science; cand. of eng. sc.; associate professor.

Turulin Igor Ilyich – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 004

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-168-176

В.А. Цыганков, О.А. Шабалина, А.В. Катаев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗМЕРА ПОПУЛЯЦИИ НА БЫСТРОДЕЙСТВИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Исследованы способы определения размера популяции в генетическом алгоритме и изучена зависимость между количеством особей и скоростью работы алгоритма. Описываются методы определения оптимального количества особей в популяции разными методами: в зависимости от размера хромосом, для древовидного типа хромосом, при наличии фактора зашумленности и по методу соседнего элемента с выставлением максимальной и минимальной границы. Данные, полученные по выполнению каждого метода, отличаются между собой, по причине этого произведена оценка с целью проверить точность теоретических данных, сравнив их с экспериментальными. Для проведения экспериментов была разработана программа на графической платформе «Unity» с возможностью изменения количества особей в популяции. После получения результатов было проведено сравнение экспериментальных данных с данными, полученными на основе методов определения размера популяции в генетическом алгоритме из первой части работы. Эксперимент показал, что оптимальный размер популяции лежит в диапазоне 100-160 особей. При уменьшении их количества время выполнения поставленной задачи начинает существенно увеличиваться, а при увеличении за расчетный предел – сокращение времени выполнения не соответствует затрачиваемым вычислительным ресурсам. Сами полученные экспериментальные данные имеют наименьшую погрешность с методом, используемым древовидное представление хромосом. Результаты исследования могут быть использованы для выбора размера популяции при обучении для достижения лучшего соотношения затрачиваемой вычислительной мощности к скорости обучения, а определенный в процессе работы метод может помочь в теоретических расчетах.

Генетический алгоритм; размер популяции; метод определения размера популяции; имитационная модель; хромосома; коэффициент зашумленности; оптимизация; объект с изменяемым поведением; неигровой персонаж; мутация.

V.A. Tsygankov, O.A. Shabalina, A.V. Kataev

INVESTIGATION OF THE IMPACT OF POPULATION SIZE ON THE PERFORMANCE OF A GENETIC ALGORITHM

The paper investigates ways to determine the population size in a genetic algorithm and studies the relationship between the number of individuals and the speed of the algorithm. Methods for determining the optimal number of individuals in a population by different methods are described: depending on the size of the chromosomes, for a tree-like type of chromosomes, in the presence of a noise factor and by the method of a neighboring element with a maximum and minimum boundary. The data obtained by performing each method differ from each other, for this reason, an assessment was made in order to verify the accuracy of theoretical data by comparing them with experimental ones. To conduct experiments, a pro-

gram was developed on the Unity graphics platform with the ability to change the number of individuals in the population. After receiving the results, the experimental data were compared with the data obtained on the basis of methods for determining the population size in the genetic algorithm from the first part of the work. The experiment showed that the optimal population size lies in the range of 100-160 individuals. With a decrease in their number, the execution time of the task begins to increase significantly, and with an increase beyond the calculated limit, the reduction in execution time does not correspond to the computing resources expended. The experimental data obtained themselves have the smallest error with the method used by the tree representation of chromosomes. The results of the study can be used to select the size of the population during training in order to achieve a better ratio of computing power to learning speed, and a method defined in the course of work can help in theoretical calculations.

Genetic algorithm; population size; population size determination method; simulation model; chromosome; noise factor; optimization; object with variable behavior; non-player character; mutation.

Введение. Генетический алгоритм (ГА) представляет собой класс оптимизационных методов, применяемый для решения широкого круга задач, таких как оптимизация, моделирование, анализ и нахождение глобального экстремума [1, 2].

Генетический алгоритм анализирует множество входных параметров оптимизированной задачи и оперирует совокупностью особей (популяцией), которые представляют собой строки с закодированным в них решением задачи. Во время подбора различных решений, наиболее подходящих по условиям задачи, «выживает» наиболее «приспособленная особь», которая является носителем оптимального решения [2–4]. Их эффективное использование зависит от способа представления и отбора решений, выбора операторов мутации и принципов формирования начальной популяции альтернативных решений. В настоящее время многие современные системы характеризуются нечеткостью входной и выходной информации, что часто делает некорректным их эффективное функционирование [4]. Это приводит к невозможности и затруднению практического применения существующих систем и методов поддержки принятия решений [5].

Одним из основных параметров ГА является размер популяции, от него зависит надежность алгоритма и время решения поставленной задачи [6, 7]. Данная работа посвящена исследованию воздействия размера популяции на быстродействие ГА и нахождению оптимального её размера. Целью работы является определение оптимального размера популяции в зависимости от входных и требуемых данных, условий и сравнение полученных результатов с уже разработанными способами.

Модели и методы определения размера популяции в генетическом алгоритме. Подбор оптимального размера популяции важен, так как он определяет эффективность поиска оптимального значения функции приспособленности. В случае выбора маленького размера возможно появление таких областей, которые не могут быть исследованы оператором кроссинговера, что отрицательно влияет на надежность алгоритма (в такой области может оказаться глобальный экстремум) [8]. Для организации оптимизирующего процесса необходимо создать направляющую силу развития популяции. В качестве такой силы выступает требование минимизации целевой функции или, в терминах генетических алгоритмов, фитнес функции. Обычно в качестве её используется аддитивный показатель оптимальности, основанный на штрафах. Преимуществом такого выбора является возможность настройки алгоритма под конкретную задачу путём варьирования коэффициентов и, тем самым, изменения приоритетов при поиске оптимального решения [9]. В случае выбора пользователем слишком большого размера популяции алгоритм будет тратить на решение поставленной задачи значительно больше времени, чем необходимо из-за большего расчёта целевой функции [10].

Однако в настоящее время данная область становится все более востребованной и появляются большое количество новых методов определения оптимального размера популяции. Так, в работе [11], размер популяции определяется от размера хромосомы и заданной вероятности события попадания битов в требуемый диапазон. Для этого были предложены формулы для определения минимального допустимого количества особей в популяции:

$$N > \log_{0.5} \left(\frac{1 - \sqrt[L]{P(S_L^N)}}{2} \right), \quad (1)$$

где N – размер популяции; P – вероятность события; L – размер хромосомы; b – i -й бит j -й хромосомы; S – событие, когда после инициализации ГА с размером популяции N и числом бит в хромосоме L для любого $1 \leq k \leq L$, выполняется неравенство:

$$0 < \sum_{j=1}^N b_k^j < N. \quad (2)$$

Формулы (1, 2) позволяют определить минимальное количество индивидуумов для решения задачи с требуемой точностью, зная только размер (битность) хромосомы.

В работе [12] рассматривалось влияние размеров популяции при древовидном представлении хромосом [13] на скорость сходимости и описывался эксперимент. В ней производилась оценка скорости сходимости от количества итераций, по прошествии которого значение приспособленности лучшей особи перестает увеличиваться. В результате эксперимента показано, что зависимость скорости работы алгоритма от количества особей имеет экспоненциальный вид. Таким образом, можно сделать вывод, что рост эффективности от добавления каждого нового члена популяции снижается. Главной задачей является найти тот размер популяции, при котором некоторое количество особей будут выдавать приемлемую скорость сходимости, но не будут перегружать машину [14].

В работе [15] описана модель для прогнозирования качества сходимости генетических алгоритмов от размера популяции в обычных условиях (3) и при наличии фактора зашумленности (4):

$$N = -2^{k-1} \ln(\alpha) \frac{\sigma_{bb} \sqrt{\pi m'}}{d}. \quad (3)$$

$$N = -2^{k-1} \ln(\alpha) \frac{\sqrt{\pi m' \sigma_{bb}^2 + \sigma_F^2}}{d}, \quad (4)$$

где σ_{bb} – дисперсия пригодности; α – частота отказов; bb – количество блоков; d – разность между пригодностями индивидов; m' – количество разделов хромосом; $k > m'$; F – коэффициент зашумленности.

Данная модель использует классификацию индивидуумов, опираясь на данные от предыдущих итераций. И представляет собой комплиментарность генетических алгоритмов и одноразовых расчетов. Которая возможна благодаря использованию блоков инициализации.

В статье [16] был разработан метод для автоматического определения размера популяции для выполнения расчета размерных цепей по методу соседнего элемента (По допуску замыкающего звена подбираются допуски составляющих звеньев). Для этого предложена формула:

$$(k) = \left(\frac{1}{k} \sum_{j=1}^k Dj \right) \left(\frac{1}{N - (k+1)} \sum_{j=k+1}^N Dj \right) = \frac{1}{k(N-1) - k^2} \left(\sum_{j=1}^k Dj \right) \left(\sum_{j=k+1}^N Dj \right), \quad (5)$$

где k – размер популяции; Dj – дисперсия повторяющихся значений при заданном размере популяции; N – предельное значение размера популяции.

В основе данного метода лежит регрессионная модель, с помощью которой возможно определить размер популяции в зависимости от допустимого количества значений независимой переменной [17]. Это позволяет моделировать формирование популяции без привязки к конкретным значениям переменных. Его удобно использовать в задачах дискретной оптимизации с целевыми функциями нескольких переменных, где области допустимых значений конечны и имеют небольшую размерность.

Рассмотренные методы определения оптимального количества популяции различаются используемыми параметрами и искомыми данными. Соответственно, полученные оптимальные значения о количестве популяции могут также различаться в зависимости от выбранного способа.

В статье [18] описан эксперимент, целью которого было определение изменчивости параметров модели от различных размеров популяции. По итогам данной работы были выделены три основных параметра и определены их диапазоны: максимальная удельная

скорость роста ($0 < \mu_{\max} < 0,7$), константа «насыщенности» ($0 < k_s < 1$) и коэффициент продуктивности ($0 < Y_{S/X} < 30$). При популяции в сто особей были получены следующие данные: $\mu_{\max} = 0,4881$; $k_s = 0,012$ и $Y_{S/X} = 2,0193$. Однако сам расчет размера популяции, в данной работе, не производился.

Разработка имитационной модели поведения объектов на основе генетического алгоритма. Для нахождения зависимости скорости работы генетических алгоритмов для обучения НС от размера популяции была разработана имитационная модель целенаправленной жизни объектов с изменяемым поведением в виртуальной среде. Модель представляется кортежем вида:

$$Life = (Entities, Goals, Behavior),$$

где *Life* – имитационная модель целенаправленной жизни;

Entities – множество сущностей, способных изменять свое положение в пространстве;

Goals – множество целей сущностей;

Behavior – алгоритм поведения сущностей для достижения поставленных целей.

В течение своей жизни, определяемой заданным промежутком времени, каждый объект стремится достичь максимально возможное количество целей, предопределенных средой. Для моделирования поведения объектов использован генетический алгоритм. Для предотвращения потери лучших решений и обеспечения повышенной сходимости алгоритма селективный отбор проводился элитарным методом (Только один предок с наивысшим счетом и наименьшим временем «давал» потомство) [19].

Реализация имитационной модели в среде разработки Unity. Имитационная модель реализована в программе на графической платформе «Unity» [20]. В среде создается сцена с полем, на котором находятся некоторое количество «комнат» (рис. 1), в которых объекты представлены в виде неигровых персонажей (НИП, NPC) и Целей (рис. 2). НИП состоит из головы (Воксель, способный поворачиваться на 180° в вертикальной и на 30° в горизонтальной плоскости) и тела (пяти последовательно соединенных вокселей, способных поворачиваться на 180° в вертикальной плоскости относительно друг друга). Цель – одиночный воксель. Задачей НИП является сбор наибольшего количества целей за отведенное время. Цель появляется в пределах своей комнаты, но НИП может её покинуть. Каждый НИП видит только свою Цель и не может взять чужую. Как только он достигает Цели, она появляется в другом месте комнаты, а счетчик НИП увеличивается на единицу и записывается время достижения данной Цели.

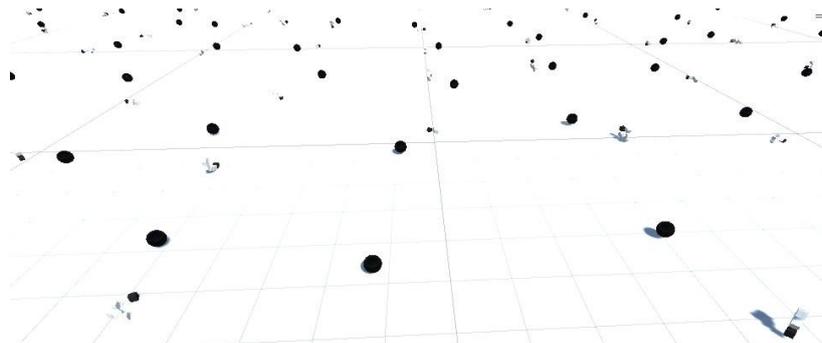


Рис. 1. Внешний вид поля с «комнатами»

Имитационная модель была успешно апробирована на задаче определения оптимального коэффициента мутации [21].

Для большей автономности работы был добавлен автостарт после завершения цикла, появилась возможность сохранения паттерна поведения в файл для его дальнейшего использования и сброс счетчиков и битов поведения без необходимости завершения работы. Для ускорения работы программы была в два раза уменьшена зона появления целей для каждой особи.

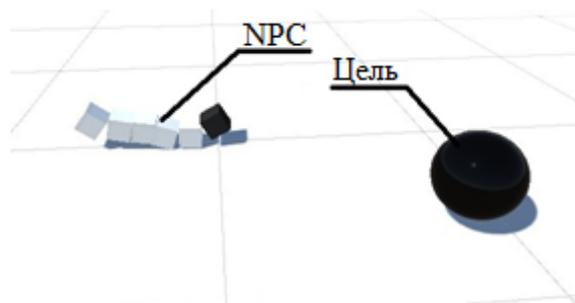


Рис. 2. НИП и Цель

В модифицированной версии был усовершенствован алгоритм работы. После базовой настройки и запуска создается случайный паттерн поведения для первой популяции и сохраняется во временной буфер. Во время запуска первой итерации включается таймер. Если за время итерации ни одна из особей достигает поставленной цели, таймер останавливается, а результаты сохраняются, паттерн поведения заменяется паттерном из буфера, а популяция увеличивается. После этого цикл начинается заново. Данная логическая схема работы программы показана на рис. 3.

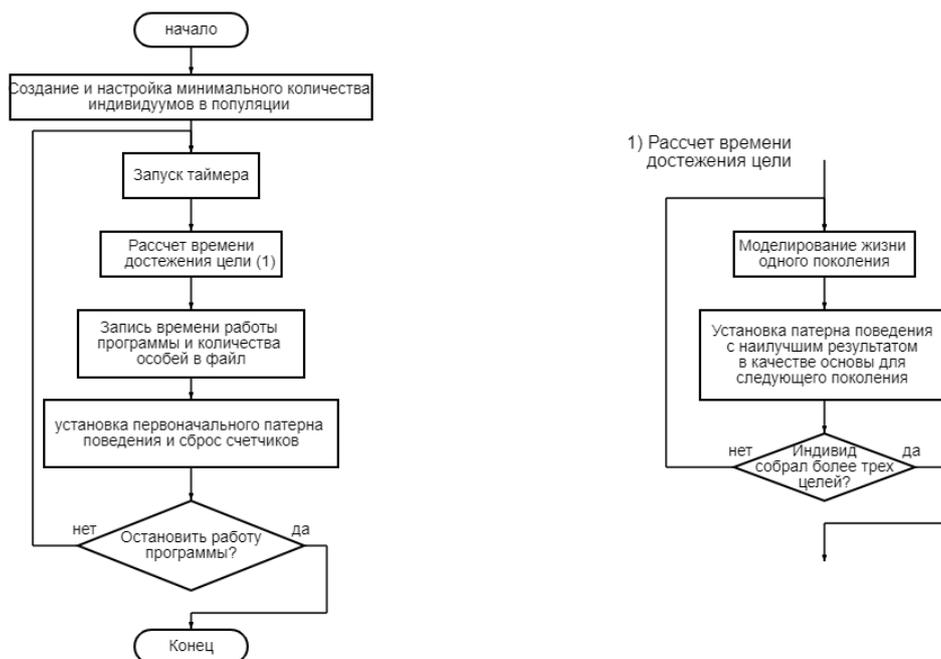


Рис. 3. Алгоритм работы программы

Примеры применения имитационной модели для определения размера популяции. Расширенная версия имитационной модели применена для исследования зависимости скорости работы программы от размера популяции. Эксперимент по определению зависимости скорости работы программы от размера популяции включал задание минимального количества особей в популяции, мониторинг нынешнего числа особей в популяции и времени выполнения поставленной задачи. Таким образом, в первой итерации создается десять особей, после выполнения поставленной цели и записи результатов, количество особей в следующий итерации увеличивается на десять. Данный цикл идет до тех пор, пока размер популяции не достигнет 300 особей или пользователь сам не остановит работу программы. В ходе работы были определены следующие параметры для

популяции в 100 особей: $\mu_{\max}=0,4092$; $k_S=0,046$ и $Y_{SX}=2,8979$. Данные значения лежат в допустимых пределах, представленные в работе [18]. Из этого можно сделать вывод, что полученные данные адекватны и их можно использовать в дальнейшем анализе.

На рис. 4 представлены графики скорости сходимости от количества индивидуумов, полученные экспериментальным путем и рассчитанные по размеру хромосомы [11], при древовидном их представлении [12], при учете фактора зашумленности [15], максимального и минимального соседнего элемента [16].

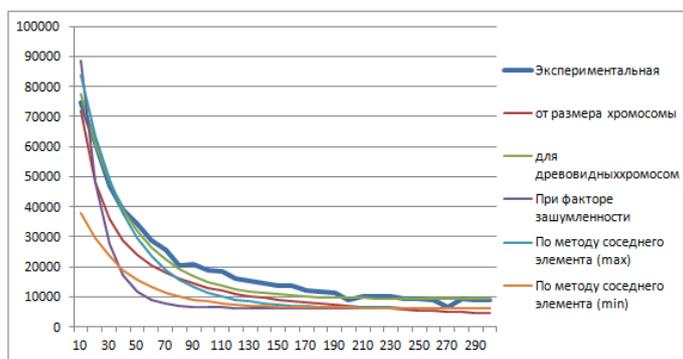


Рис. 4. Зависимости скорости сходимости от количества индивидуумов по размеру хромосомы, рассчитанные по теоретическим методам и полученные экспериментально

Результаты эксперимента показали, что размер популяции должен находиться в диапазоне 100-160 особей. Разность между соседними показателями данной области составила 0.13–0.8%. При увеличении популяции время выполнения задачи сокращается незначительно – в общей сложности не более 9,3% (Разность соседних значений не превышает 0,5%); при уменьшении – время работы критично возрастает от 2.4%. Полученные экспериментальные данные имеют наименьшую погрешность с методом [12], использующим древовидное представление хромосом.

Результаты проведенного исследования могут быть полезны при определении оптимального размера популяции для достижения наилучшего соотношения между затрачиваемой вычислительной мощностью и скоростью обучения алгоритма.

Заключение. В работе представлена имитационная модель целенаправленного поведения объектов в виртуальной среде на основе генетического алгоритма, реализованная в среде Unity. Описано применение модели для нахождения зависимости скорости работы генетических алгоритмов для обучения НС от размера популяции. Исследованы теоретические способы определения размера популяции в генетическом алгоритме разными теоретическими методами и зависимости между количеством особей и скоростью работы алгоритма.

В рамках дальнейшей работы предполагается дальнейшая модификация модели для её использования при тестировании зависимости нескольких параметров одновременно с целью определения их корреляции и нахождения оптимальных значений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Солодовников В.И. Использование генетических алгоритмов в задачах анализа данных и построения систем правил // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2013. – № 16. – С. 72-77.
2. Шукин М.А. Генетические алгоритмы как метод решения математических задач // Вестник УРАО. – 2014. – № 5. – С. 168-172.
3. Корнеев А.С., Ляхов М.С., Тарнецкая А.В. Использование генетических алгоритмов для решения задач оптимизации в электроэнергетике // IX Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ». Апрель 2017. – 4 с. – Режим доступа: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2017/RM17/pages/Articles/0201038>.

4. Щеглов С.Н. Анализ моделей принятия решений в новых информационных технологиях в условиях нечеткости и неопределенности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 132 (7). – С. 126-131.
5. Курейчик В.В., Курейчик Вл.Вл, Саак А.Э. Эволюционный алгоритм для решения задачи диспетчеризации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 2 (219). – С. 50-59.
6. Janne Koljonen, Jarmo Alander. Effects of population size and relative elitism on optimization speed and reliability of genetic algorithms. – January 2006. – P. 1-7.
7. Yu-an Zhang, Makoto Sakamoto, Hiroshi Furutani. Effects of Population Size and Mutation Rate on Results of Genetic Algorithm. – January 2008. – P. 47-55.
8. Цой Ю.Р. Влияние размера популяции и поиска от ограничения по времени работы генетического алгоритма. – Томск: Томский политехнический университет, 2003. – 7 с.
9. Гончарова А.С., Бекетова О.С., Заросило Л.Р. Модели генетических алгоритмов // Молодой ученый. – Февраль 2015. – № 1 (1). – С. 32-33.
10. Цой Ю.Р. Решение задач линейного программирования с помощью генетического алгоритма. – Томск: Томский политехнический университет, 2003. – 2 с.
11. Читига А.Ф., Петров Ю.Ю. Оценка выбора размера популяции в простом генетическом алгоритме // Информационное противодействие угрозам. – 2005. – № 5. – С. 26-29.
12. Глебов А.В., Стрикелев Д.А. Влияние размера популяции на скорость сходимости генетического алгоритма при древовидном представлении хромосом // Электронная библиотека БГУ. – Апрель 2010. – С. 3. – Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/28657>.
13. Glebov A., Strykeleu D. Experimental convergence study of a genetic algorithm using consistency-preserving genetic operators for tree-like chromosomes // Modern problems of mathematics and computer engineering. – 2009. – P. 3-5.
14. Randy Haupt. Optimum Population Size and Mutation Rate for a Simple Real Genetic Algorithm that Optimizes Array Factors // Antennas and Propagation Society International Symposium. – 2000. – P. 173-186.
15. Harik G.R., Cantu-Paz E., Goldberg D.E., Miller B.L. The Gambler's Ruin Problem, Genetic Algorithms, and the Sizing of Populations // Association for Computing Machinery. – February 1999. – P. 231-253.
16. Фролов В.В. Определение размера популяции генетического алгоритма для задач дискретной оптимизации в САПР // Системный анализ и прикладная информатика. – 2018. – № 3. – С. 9-16.
17. Сапрыкин А.Н., Акинина К.Д., Сапрыкина Е.Н. Оптимальное число конвергируемых поколений и полезных особей при варьирующихся значениях вероятности мутации генетического алгоритма на малых пространствах поиска // Современные технологии в науке и образовании: Сб. трудов II международной научно-технической и научно-методической конференции. Т. 4. – Рязань: РРТИ, 2017. – С. 248-252.
18. Roeva O., Fidanova S., Paprzycki M. Influence of the population size on the genetic algorithm performance in case of cultivation process modeling // Computer Science and Information Systems. – 2013. – P. 371-376.
19. Частикова В.А. Идентификация механизмов реализации операторов генетического алгоритма в экспертных системах продукционного типа // Научный журнал КубГАУ. – 2012. – № 75.
20. Корнилов А. UNITY. Полное руководство. – 2-е изд. – СПб.: Наука и Техника, 2021. – 496 с.
21. Цыганков В.А., Шабалина О.А., Катаев А.В. Использование генетических алгоритмов для повышения скорости обучения нейронных сетей // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 3.

REFERENCES

1. Solodovnikov V.I. Ispol'zovanie geneticheskikh algoritmov v zadachakh analiza dannykh i postroeniya sistem pravil [The use of genetic algorithms in data analysis tasks and the construction of rule systems], *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh* [New information technologies in automated systems], 2013, No. 16, pp. 72-77.
2. Shchukin M.A. Geneticheskie algoritmy kak metod resheniya matematicheskikh zadach [Genetic algorithms as a method of solving mathematical problems], *Vestnik URAO* [Bulletin of the University of the Russian Academy of Education], 2014, No. 5, pp. 168-172.
3. Korneev A.S., Lyakhov M.S., Tarnetskaya A.V. Ispol'zovanie geneticheskikh algoritmov dlya resheniya zadach optimizatsii v elektroenergetike [The use of genetic algorithms for solving optimization problems in the electric power industry], *IX Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya molodykh uchennykh «ROSSIYA MOLODAYA». Aprel' 2017* [IX All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists “YOUNG RUSSIA”. April 2017], 4 p. Available at: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2017/RM17/pages/Articles/0201038>.

4. *Shcheglov S.N.* Analiz modeley prinyatiya resheniy v novykh informatsionnykh tekhnologiyakh v usloviyakh nechetkosti i neopredelennosti [Analysis of decision-making models in new information technologies in conditions of fuzziness and uncertainty], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 132 (7), pp. 126-131.
5. *Kureychik V.V., Kureychik V.I., Saak A.E.* Evolyutsionnyy algoritm dlya resheniya zadachi dispetcherizatsii [An evolutionary algorithm for solving the dispatching problem. Iyul], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 2 (219). pp. 50-59.
6. *Janne Koljonen, Jarmo Alander.* Effects of population size and relative elitism on optimization speed and reliability of genetic algorithms. January 2006, pp. 1-7.
7. *Yu-an Zhang, Makoto Sakamoto, Hiroshi Furutani.* Effects of Population Size and Mutation Rate on Results of Genetic Algorithm, January 2008, pp. 47-55.
8. *Tsoy Yu.R.* Vliyaniye razmera populyatsii i poiska ot ogranicheniya po vremeni raboty geneticheskogo algoritma [The influence of population size and search time limit on genetic algorithm]. Tomsk: Tomskiy politekhnicheskii universitet, 2003, 7 p.
9. *Goncharova A.S., Beketova O.S., Zarosilo L.R.* Modeli geneticheskikh algoritmov [Models of genetic algorithms], *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. Fevral' 2015, No. 1 (1), pp. 32-33.
10. *Tsoy Yu.R.* Reshenie zadach lineynogo programmirovaniya s pomoshch'yu geneticheskogo algoritma [Solving linear programming problems using a genetic algorithm]. Tomsk: Tomskiy politekhnicheskii universitet, 2003, 2 p.
11. *Chipiga A.F., Petrov Yu.Yu.* Otsenka vybora razmera populyatsii v prostom geneticheskom algoritme [Estimating the choice of population size in a simple genetic algorithm], *Informatsionnoe protivodeystvie ugrozam* [Information counteraction to threats], 2005, No. 5, pp. 26-29.
12. *Glebov A.V., Strikelev D.A.* Vliyaniye razmera populyatsii na skorost' skhodimosti geneticheskogo algoritma pri drevovidnom predstavlenii khromosom [The influence of population size on the convergence rate of a genetic algorithm with a tree-like representation of chromosomes], *Elektronnaya biblioteka BGU* [Electronic Library of the BSU]. April' 2010, pp. 3. Available at: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/28657>.
13. *Glebov A., Strykelev D.* Experimental convergence study of a genetic algorithm using consistency-preserving genetic operators for tree-like chromosomes, *Modern problems of mathematics and computer engineering*, 2009, pp. 3-5.
14. *Randy Haupt.* Optimum Population Size and Mutation Rate for a Simple Real Genetic Algorithm that Optimizes Array Factors, *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2000, pp. 173-186.
15. *Harik G.R., Cantu-Paz E., Goldberg D.E., Miller B.L.* The Gambler's Ruin Problem, Genetic Algorithms, and the Sizing of Populations, *Association for Computing Machinery*, February 1999, pp. 231-253.
16. *Frolov V.V.* Opredeleniye razmera populyatsii geneticheskogo algoritma dlya zadach diskretnoy optimizatsii v SAPR [Determining the population size of a genetic algorithm for discrete optimization problems in CAD], *Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika* [System analysis and applied informatics], 2018, No. 3, pp. 9-16.
17. *Saprykin A.N., Akinina K.D., Saprykina E.N.* Optimal'noe chislo konvergiruemykh pokoleniy i poleznykh osobey pri var'iruyushchikhsya znacheniyakh veroyatnosti mutatsii geneticheskogo algoritma na mal'kh prostranstvakh poiska [The optimal number of convergent generations and useful individuals with varying values of the mutation probability of a genetic algorithm in small search spaces] *Sovremennye tekhnologii v nauke i obrazovanii: Sb. trudov II mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy i nauchno-metodicheskoy konferentsii* [Modern technologies in science and education: Collection of proceedings of the II international scientific-technical and scientific-methodological conference]. Vol. 4. Ryazan': RRTI, 2017, pp. 248-252.
18. *Roeva O., Fidanova S., Paprzycki M.* Influence of the population size on the genetic algorithm performance in case of cultivation process modeling, *Computer Science and Information Systems*, 2013, pp. 371-376.
19. *Chastikova V.A.* Identifikatsiya mekhanizmov realizatsii operatorov geneticheskogo algoritma v ekspertnykh sistemakh produktsionnogo tipa [Identification of mechanisms for implementing genetic algorithm operators in production-type expert systems], *Nauchnyy zhurnal KubGAU* [Scientific journal of KubSAU], 2012, No. 75.
20. *Kornilov A.* UNITY. Polnoe rukovodstvo [UNITY. Complete guide]. 2nd ed. Saint Petersburg: Nauka i Tekhnika, 2021, 496 p.
21. *Tsygankov V.A., Shabalina O.A., Kataev A.V.* Ispol'zovaniye geneticheskikh algoritmov dlya povysheniya skorosti obucheniya neyronnykh setey [Using genetic algorithms to increase the speed of learning of neural networks], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2023, No. 3.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.А. Кравченко.

Цыганков Владимир Андреевич – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: Vladimir.Tsygankov27@yandex.ru; г. Волгоград, Россия; тел.: 89176476959; магистр.

Шабалина Ольга Аркадьевна – e-mail: O.A.Shabalina@gmail.com; тел.: 89197958943; к.т.н.; доцент.

Катаев Александр Вадимович – e-mail: alexander.kataev@gmail.com; к.т.н.; доцент.

Tsygankov Vladimir Andreevich – Volgograd State technical University; e-mail: Vladimir.Tsygankov27@yandex.ru; Volgograd, Russia; phone: +79176476959; master.

Shabalina Olga Arkadevna – e-mail: O.A.Shabalina@gmail.com; phone: +79197958943; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kataev Alexander Vadimovich – e-mail: alexander.kataev@gmail.com; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.396.624

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-176-186

А.П. Плёткин

НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫЙ ДОСТУП К СИСТЕМЕ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ

Рассматриваются вопросы современного состояния исследований и тенденции в области защиты передаваемых данных передовыми криптографическими методами. Приведено описание процесса шифрования и дешифрования информации при помощи абсолютно стойкого метода одноразового блокнота – шифра Вернама. В статье представлены типичные примеры задач, реализованные в области квантовой криптографии. Последнее включает в себя такие элементы, как неопределенность исходов, запутанность на квантовом уровне и принцип неопределенности Гейзенберга. Обсуждается подход к шифрованию данных с использованием симметричных алгоритмов и выдвигаются критерии для ключей шифрования, которые гарантируют полностью конфиденциальную передачу информации. Приводится краткий обзор истории развития квантовых коммуникационных систем и криптографии, подчеркивается важность дальнейших исследований в этой сфере. Отмечается, что в криптографии ключевым аспектом безопасности является распределение ключей шифрования среди авторизованных пользователей. Квантовая криптография предлагает решение для создания и распределения ключей с помощью методов, основанных на принципах квантовой механики, которые применяются в системах квантового распределения ключей. Современные реализации систем КРК всесторонне исследуются, в том числе на предмет различного рода атак, но подавляющее большинство исследований сосредоточено на поиске уязвимостей в работе квантовых протоколов, например, через техническое несовершенство компонентов систем КРК. В работе рассматривается способ осуществления несанкционированного доступа к системе КРК в процессе калибровки аппаратуры детектирования. Исследован способ получения несанкционированного доступа к работе системы квантового распределения ключей в режиме калибровки и предложен метод противодействия. Приведены результаты натурных исследований, которые показывают, что системы квантового распределения ключей имеют уязвимости не только при работе квантового протокола, но и в других жизненно важных стадиях функционирования системы. Описанный тип атаки позволяет несанкционированно получить данные о квантовом канале связи и осуществлять управляемую помеху процессу работы системы. Предложен способ построения автокомпенсационных систем оптической связи, обеспечивающий защищенность процесса калибровки от несанкционированного доступа. Показано влияние ослабленных до фотонного уровня синхронных импульсов на вероятность верного обнаружения отрезка времени с оптическим сигналом. В статье описаны результаты экспериментов, демонстрирующие различия между теоретическими данными и фактическими характеристиками отдельных элементов системы квантовой связи.

Синхронный импульс; распределение ключей; квантовые коммуникации; алгоритм поиска; контрмеры; атаки на квантовый канал.

A.P. Pljonkin

UNAUTHORIZED ACCESS TO QUANTUM KEY DISTRIBUTION SYSTEM

The paper examines the latest research and trends in safeguarding data transmission through state-of-the-art cryptographic techniques. It details the encryption and decryption process using the one-time pad method, also known as the Vernam cipher, renowned for its unparalleled security. The work showcases common challenges addressed by quantum cryptography, which encompasses concepts like outcome unpredictability, quantum entanglement, and the Heisenberg uncertainty principle. The paper discusses the use of symmetric algorithms for data encryption and sets forth standards for encryption keys that ensure the absolute confidentiality of data exchange. It provides a concise history of quantum communications and cryptography development, highlighting the critical need for ongoing research in this domain. A pivotal aspect of cryptographic security, the distribution of encryption keys to legitimate users, is underscored. Quantum cryptography presents a method for generating and sharing keys derived from quantum mechanical principles, integral to quantum key distribution (QKD) systems. Contemporary QKD systems undergo extensive scrutiny, including their susceptibility to various attack types, with most research aimed at identifying potential weaknesses in quantum protocols, often due to technical flaws in QKD system components. The study addresses a technique for unauthorized access to QKD systems during detector calibration. Furthermore, the paper explores a strategy for illicitly infiltrating the operations of a quantum key distribution system in calibration mode and suggests a defensive approach. Field research findings are presented, revealing that QKD systems are prone to vulnerabilities not only during quantum protocol execution but also throughout other crucial operational phases. The identified attack method enables the unauthorized acquisition of data from a quantum communication channel and the manipulation of system operations. A design for auto-compensating optical communication systems is proposed to protect the calibration process against unauthorized breaches. The impact of sync pulses, reduced to single-photon levels, on accurately detecting timing intervals with an optical signal is demonstrated. The article concludes with experimental results that exhibit variances between theoretical expectations and the actual performance of individual components within a quantum communication system.

Synchronization pulse; key distribution; quantum communications; search algorithm; countermeasures; attacks on the quantum channel.

Введение. Необходимость возникновения квантовой криптографии, как средства обеспечения защищенности передаваемых сообщений возникло в качестве логического продолжения гонки создания шифров и их взлома. Современная криптография основана на сложности математических вычислений (например, асимметричное шифрование с открытым ключом) и уже известно, что теоретически такие методы будут взломаны в обозримом будущем. Таким образом, перед средствами обеспечения защищенности стоит задача использовать такой метод шифрования, который позволит сохранить конфиденциальность передаваемой информации необходимый (безопасный) период времени.

Идея квантовой криптографии заключается в том, чтобы создать вид шифрования, который невозможно взломать даже теоретически [1–3]. Существуют понятия абсолютно стойкого шифра и абсолютной секретности. Установлено, что для абсолютной секретности, ключ системы шифрования должен обладать следующими свойствами: быть абсолютно случайным; использоваться один раз; его длина должна быть не меньшей чем длина передаваемого сообщения [4].

Цель исследований состоит в том, чтобы продемонстрировать возможность несанкционированного вмешательства в работу системы квантового распределения ключей, оставаясь при этом незамеченным.

Требованиям абсолютной секретности удовлетворяют симметричные методы шифрования, такие как шифр Вернама, который также именуется одноразовым блокнотом [5, 6]. На рис. 1 представлена схема, поясняющая принцип шифрования методом одноразового блокнота.



Рис. 1. Шифрование методом одноразового блокнота

Формирователь ключа приготавливает ключ (b), каждый бит которого абсолютно случаен. Далее каждый бит исходной информации (a) складывается по модулю с каждым битом ключа: $a = 0,1,0,1$; $b = 0,0,1,1$; $a \oplus b = 0,1,1,0$. После процедуры сложения информация становится настолько же защищенной, насколько защищен ключ. Другими словами, если к любому сообщению добавить случайное сообщение (последовательность), то итоговое сообщение становится настолько же случайным. На приемной стороне Получатель производит обратную операцию с использованием ключа и получает исходную информацию. Уязвимым местом в приведенной схеме является способ передачи секретного ключа между пользователями. На практике это означает, что защищен должен быть не сам канал связи, а метод распределения ключа. Для реализации абсолютно секретной передачи должны быть соблюдены условия случайности ключа, его длины (относительно длины шифруемого сообщения) и его однократное использование. Однократное использование ключа необходимо в том числе для исключения атаки методом статистического анализа. Следовательно, в криптографических системах ключевым аспектом является гарантия безопасности, которая выражается в задаче распределения ключей шифрования между авторизованными пользователями. Методы квантовой криптографии предоставляют решение этой задачи, используя принципы квантовой физики, что находит применение в системах квантового распределения ключей (СКРК).

Современные реализации систем КРК всесторонне исследуются, в том числе на предмет различного рода атак. Подавляющее большинство исследований сосредоточено на поиске уязвимостей в работе квантовых протоколов, например, через техническое несовершенство компонентов систем КРК [7–10].

В нашей работе рассматривается способ осуществления несанкционированного доступа к системе КРК в процессе калибровки аппаратуры детектирования. Мы приводим результаты экспериментальных исследований автокомпенсационной системы КРК в различных режимах работы. В такой системе происходит компенсация фазовых изменений за счет оптического интерферометра и управляемых фазовых модуляторов [11, 12]. Работа систем КРК невозможна без процесса согласования станций, т.е. синхронизации разнесенных в пространстве передатчика и приёмника. В СКРК синхронизация заключается в высокоточном определении длины пути распространения оптического импульса и базируется на регистрации момента приёма синхроимпульса фотодетекторами. Под длиной пути будем понимать физическое расстояние, которое проходит оптический импульс от источника излучения до фотодетекторов. Отметим, что в различных реализациях систем КРК источник излучения и фотодетекторы могут располагаться в одном корпусе системы или по раздельности – источник излучения на передающей стороне, а фотодетекторы на приемной.

Известно, что наиболее эффективной формой сигнала в системах квантовой связи является периодическая последовательность оптических импульсов. Процесс синхронизации представляет собой последовательную отправку оптических импульсов с их последующим детектированием лавинными фотодетекторами. Так как процесс детектирования осуществляется пошагово, то такой тип синхронизации можно называть тактовым, т.е. передача и анализ осуществляется по тактам. В работе рассматривается волоконно-

оптическая реализация системы КРК, где источник излучения и фотодетекторы находятся в одном корпусе приемо-передающей станции. В кодирующей станции находится классический детектор синхронизации сигнала, фазовый модулятор для внесения изменений в сигнал.

Зная предельно допустимую длину квантового канала связи, скорость распространения оптических импульсов в волокне, можно вычислить максимальное время сигнала от источника излучения до кодирующей станции и обратно до фотодетекторов. Для функционирования системы КРК необходимо в определенный момент времени запускать лавинный фотодетектор. Этот момент времени измеряется в пикосекундах. Особенностью работы лавинных фотодетекторов является то, что они срабатывают при попадании первой частицы. При этом, последующие попадания не влияют на работу и не учитываются счетчиком. Временной интервал, в течение которого ОЛФД может регистрировать сигнал, назовем активным интервалом. После срабатывания, ОЛФД необходимо время для восстановления рабочего режима (мертвое время). Таким образом, для срабатывания детектора не имеет значения мощность импульса, или, в нашем случае количество фотонов в импульсе. Достаточно единичного фотона для запуска лавины. С другой стороны, если активный интервал будет открыт в течение 1 секунды, то мы не узнаем точное время попадания частицы в ОЛФД. Последнее означает, что на выходе из фотодетектора будет только сигнал о том, что за одну секунду было срабатывание. В работе [13] описана схема распространения оптического сигнала в автокомпенсационной системе КРК, а на рис. 2 показан процесс анализа временного интервала при обнаружении оптического синхросигнала.

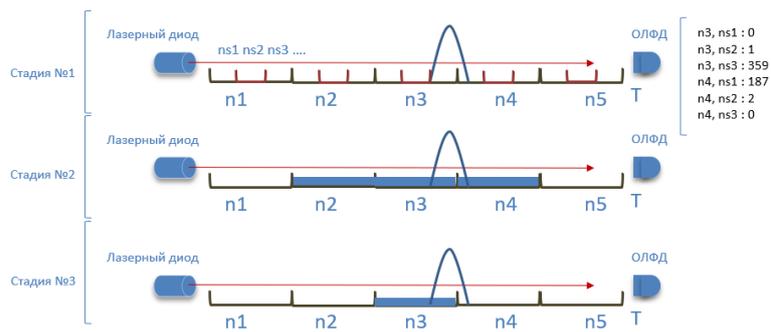


Рис. 2. Процесс обнаружения сигнала

Заключается в разбиении всего периода следования T на временные интервалы (временные окна) и подынтервалы. Период следования T – это время, выраженное через расстояние от источника излучения до кодирующей станции и обратно до фотодетекторов. Технически не имеет значения наличие кодирующей станции, так как ее функция на данном этапе заключается в отражении сигнала. Учитывая последнее, на рис. 2 источник излучения и фотодетекторы расположены на одной временной оси без отображения кодирующей станции. Разобьем весь период T на временные окна n . При этом $n=1$ нс. На всех трех этапах длительность временного окна одинаковая.

Стадия №1. Каждое временное окно разбивается на три равных по длительности подынтервала (ns). Источник излучения осуществляет посылку оптического импульса с частотой 800Гц. Начальный момент посылки обозначим как момент 0 на оси времени. Фотодетекторы устанавливают активный интервал, равный ns и запускают его после каждой посылки импульса. Введем понятие временной задержки детектирования сигнала (d) – временной интервал, в течение которого лавинный фотодиод неактивен. При каждой посылке оптического импульса, параметр $d=d+ns$, т.е. временная задержка детектирования увеличивается на один подынтервал каждую итерацию. Активный интервал ОЛФД при этом не меняется. В каждом подынтервале регистрируется преобразование

фотона в первичный электрон. Для каждого n_s осуществляется посылка порядка 800 импульсов. Последнее сделано для исключения ошибок при детектировании из-за темновых токов фотодетекторов. Таким образом, происходит последовательный анализ каждого временного подынтервала на всем периоде T . В каждом n_s фиксируется количество срабатываний фотодетектора. На рис. 2 количество срабатываний на стадии №1 обозначено значениями 0,1,359,187,2,0. Видно, что разница между сигналом и ложными срабатываниями значительна. Система определяет временное окно n_{max} , к которому относится подынтервал n_s с максимальным значением.

Стадия №2. Алгоритм калибровки аналогичен первой стадии, но теперь система анализирует не весь период T , а только временной отрезок длительностью 3 нс. Для этого берутся три временных окна: $n_{max}-1$; n_{max} ; $n_{max}+1$, т.е. временное окно с максимальным числом срабатываний на первой стадии, предшествующее ему и следующее за ним по порядку. Каждое из n временных окон разбивается на подынтервалы таким образом, чтобы длительность каждого n_s составляла 60 пс. Суммарное число подынтервалов на второй стадии равно 51 (по 17 n_s в каждом n). Система определяет временное окно n_{max} , к которому относится подынтервал n_s с максимальным значением.

Стадия №3. Алгоритм аналогичен предшествующим стадиям, но параметры и форма синхроимпульса отличаются. На этом этапе используется трейн мощных импульсов. Временной подынтервал n_s с максимальным числом срабатываний, определенный на второй стадии, разбивается на подынтервалы с длительностью каждого 10 пс. Каждый из этих подынтервалов анализируется более 10000 раз.

Таким образом, итогом процесса синхронизации во временном выражении является интервал, равный 10 пс, а в выражении расстояния – измеренная длина квантового канала в метрах.

В [13, 14] описаны результаты натурных испытаний квантово-криптографической сети на базе системы КРК Clavis2 3110 фирмы IDQuantique и показано, что процесс синхронизации формирует многофотонные импульсы, а фотодетекторы работают в линейном режиме. Используя построенную энергетическую модель действующей системы КРК Clavis2 3110, покажем, что в режиме синхронизации не задействованы алгоритмы контроля мощности. Энергетическая модель системы КРК описывает характеристики аппаратуры детектирования. Для каждой стадии значение мощности (P) импульсов составляет: $P_1=-48,3$ дБм, $P_2=-55,8$ дБм, $P_3=-24,2$ дБм (измерения проводились при помощи Yokogawa AQ2202). Суммарные потери в кодирующей станции (-47,7 дБм). Энергия фотона с учетом коэффициента преломления для волокна Corning®SMF-28e+ равна

$$E(p), [\text{Дж}] = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 2,01 \cdot 10^8}{1550 \cdot 10^{-9}} = 0,0085 \cdot 10^{-17}.$$

Частота следования (f) для каждой стадии составляет: $f_1=800$ Гц, $f_2=800$ Гц, $f_3=5$ МГц. Длительность синхроимпульса $\tau=1$ нс не изменяется. Моделирование показывает, что только при длине квантового канала в 50 км, среднее число фотонов в импульсе приближается к единице (усредненное значение трех этапов синхронизации). Стоит подчеркнуть, что начальный этап калибровки обладает самыми высокими энергетическими параметрами. Это критически важно для максимизации вероятности детектирования сигнала на этой стадии, поскольку любая ошибка в обнаружении или упущение сигнала на этапе начальной синхронизации может привести к серьезным ошибкам в детектировании на всех последующих этапах. Мощность лазера в системе не регулируется в соответствии с длиной квантового канала. Достижение однофотонного режима происходит за счет ослабления сигнала, что следует понимать не как разделение фотона, а как его присутствие в каждом отдельном i -ом импульсе. На практике это означает, что при однофотонной передаче, аттенуатор настраивается таким образом, чтобы энергия (мощность) детектировалась только в каждом десятом импульсе.

Покажем экспериментально, что калибровка в многофотонном режиме является уязвимостью для злоумышленника. Целью несанкционированного доступа к аппаратуре может быть не только перехват и расшифровка информации, но и создание помех в работе СКРК.

Схема экспериментального стенда показана на рис. 3. Станции системы КРК находятся в одном помещении и соединены квантовым каналом переменной длины (катушки оптического волокна Corning®SMF-28e+ длинами 1, 2, 4, 25 км).

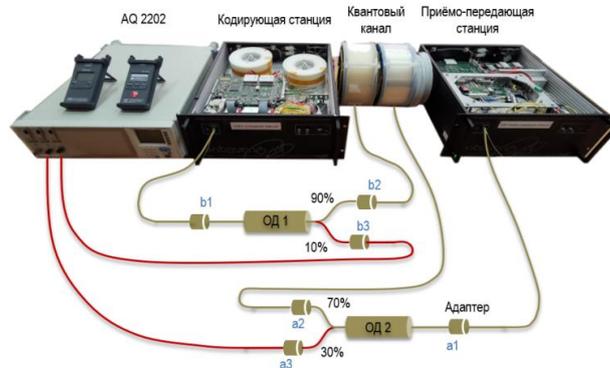


Рис. 3. Экспериментальный стенд

В точках соединения (адаптер) оптических катушек подключены последовательно два волоконно-оптических ответвителя (ОД) с коэффициентами деления $0,7 \times 0,3$ и $0,1 \times 0,9$. Выход приемо-передающей станции соединен с входом (a1) делителя, выход (a2) соединен с выходом (b2) через квантовый канал. Вход делителя (b1) соединен с выходом кодирующей станции получателя. Выходы (b3) (a2) подключены к измерителю оптической мощности и источнику излучения.

Технически внедрение ответвителей в волоконно-оптический канал связи не является сложной задачей и обеспечивается двумя точками подключения. Внедрение злоумышленника в квантовый канал позволяет получить технические данные о нем. Например, методами рефлектометрии можно определить расстояние до станций, а при помощи зондирующего импульса рассчитать время перелета сигнала от кодирующей станции. Анализ зондирующего сигнала, идущего только в одну сторону, не предоставляет полной картины параметров квантового канала. Установка двух ответвителей дает возможность вычислить время, необходимое для возврата отраженного сигнала, что является ключевым для перехвата зондирующего сигнала при его обратном распространении. Зная время возврата сигнала, можно точно определить расстояние до кодирующего устройства и обратно, что может быть использовано для осуществления атаки типа "Троянский конь". В проведенном нами эксперименте была испытана другая техника атаки, позволяющая создавать помехи в системе, оставаясь незаметным.

Система КРК Clavis2 3110 введена в рабочий режим и синхронизирована. Работа квантового протокола BB84 осуществляется в штатном режиме, ключи циклично формируются, повторная синхронизация проходит успешно. Уровень ошибок QBER не превышает критический. Оптические ответвители были интегрированы в разрыв квантового канала на этапе калибровки (подсоединение осуществлялось при помощи переходных адаптеров). В таком режиме эксперимент длился 24 часа. Система КРК функционировала без сбоев, пополняя банк квантовых ключей и наличие в оптическом канале связи двух ответвителей мощности не было выявлено системой. Анализ сигналов на выходах (a3) и (b3) позволяет определить режим работы системы. Для осуществления помехи, к выходу (b3) подключается источник оптического излучения Yokogawa AQ2202 и в случайные моменты времени осуществляется подача сигнала-помехи. Помеха подавалась в течение нескольких временных интервалов с длительностью от 5 секунд до 5 минут. В режиме воздействия помехи запускался процесс повторной калибровки, при этом система не останавливала работу и не выдавала ошибок. После выключения помехи, возобновлялась работа квантового протокола. На рис. 4 показаны результаты компьютерного моделирования на основе полученных экспериментальных данных измеренной квантовой ошибки (QBER).

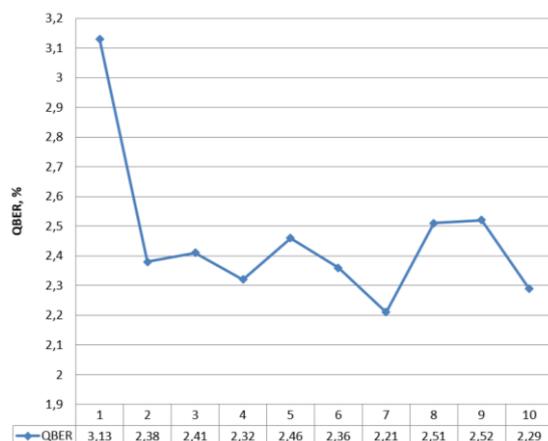


Рис. 4. Собранные данные о QBER

Зависимости на рисунке не показывают значительных отклонений. Анализ динамики квантовой битовой ошибки не обнаруживает индикаторов несанкционированного влияния на систему. Это также подтверждается информацией, представленной на рис. 5, демонстрирующем процесс генерации квантовых ключей во время эксперимента.

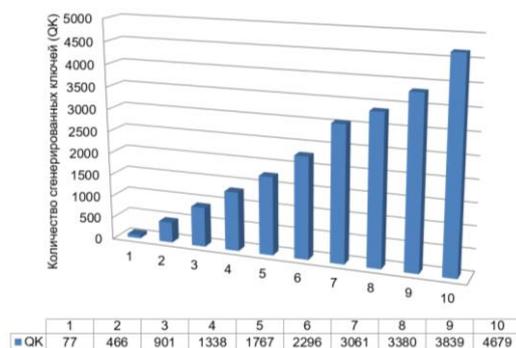


Рис. 5. Процесс аккумуляции квантовых ключей

Итерации формирования ключей отражены на оси абсцисс. Ось ординат показывает количество накапливаемых 512-битных ключей в цикле.

Информация, представленная на рис. 4 и 5, была получена при использовании квантового канала длиной 25732 метра. Выявленные данные не дают возможности установить конкретные моменты времени, когда происходило воздействие помех на систему. При проецировании аппроксимированной зависимости (согласно рис. 5) на временную ось, можно заметить временные задержки в циклах с активированными помехами, отклонение которых не превышает 10% от среднего времени цикла формирования ключей. Такие задержки могут периодически возникать в процессе работы системы КРК и могут быть связаны с неоднородностями квантового канала или физическими изменениями в оптическом волокне, например, из-за влияния температур. Следовательно, анализ временных зависимостей в циклах накопления ключей также не указывает на наличие несанкционированных ответвлений в канале связи и не свидетельствует о неавторизованном вмешательстве. Обратимся к статистическим данным на рис. 6 и 7, где представлены зависимости накопленных ключей, QBER при различных длинах оптического канала связи. Экспериментальные результаты получены без использования ответвителей (т.е. без внесения помехи).

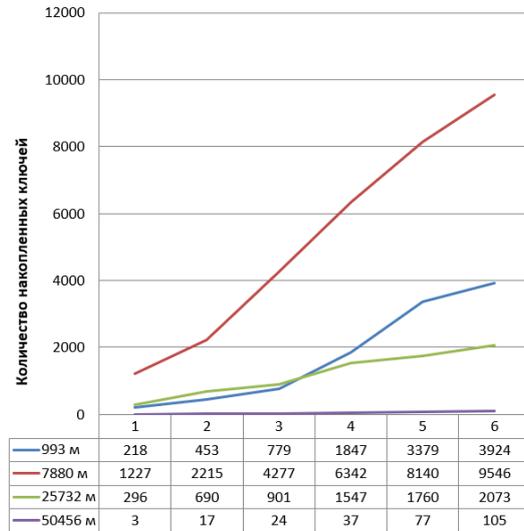


Рис. 6. Экспериментальные данные работы протокола

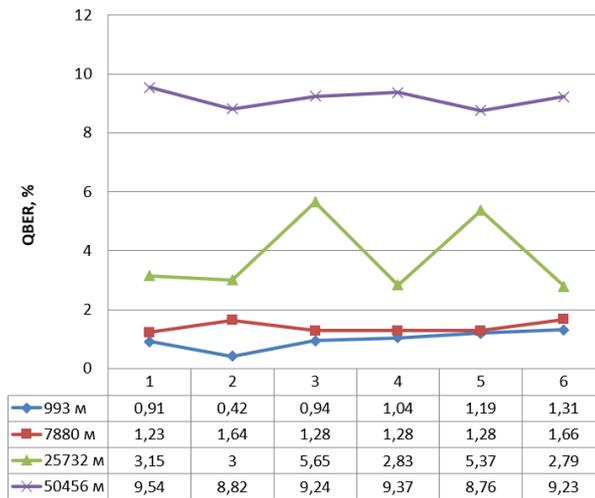


Рис. 7. Статистические данные работы квантового протокола BB84, QBER

Иллюстрация демонстрирует статистику работы квантового протокола BB84. На графике по оси абсцисс отложены итерации, а по оси ординат – число сгенерированных 512-битных ключей. Различные кривые соответствуют разным длинам квантового канала.

Анализ данных показывает, что за 6 итераций было собрано максимум 9546 ключей при длине квантового канала 7880 метров. Отчетливое различие наблюдается на графике для волоконно-оптической линии связи длиной 50456 метров, где количество ключей, сформированных за одну итерацию, заметно отличается от аналогичного показателя при меньшей длине ВОЛС, но тенденция роста остается неизменной. Это различие обусловлено значительным ослаблением сигнала из-за предельной длины квантового канала. Показатели QBER в диапазоне от 8,76 до 9,54 при длине квантового канала 50456 метров являются высокими, но не достигают критического уровня, так как не превышают расчетное значение QBER в 11%. Сравнивая изменения в количестве накопленных ключей и QBER с учетом наличия или отсутствия ответвителей, мы обращаем внимание на данные, представленные на рис. 5-8, сделанные для квантового канала длиной 25732 метра. При использовании ответвителей значение QBER находится в пределах от 2,3 до 3,1, в то

время как без ответвителей – от 2,8 до 5,7. Эти показатели находятся в приемлемых пределах и не свидетельствуют о присутствии злоумышленника в канале. Кроме того, экспериментальные данные показывают, что значения QBER без ответвителей превышают те, что были получены с их использованием.

Последнее указывает на то, что внешние дестабилизирующие факторы оказывают наиболее существенное влияние на QBER чем наличие дополнительных подготовленных соединений в канале связи.

Ось абсцисс – итерации, ординат – уровень квантовой ошибки. Разные зависимости – разные длины квантового канала.

Результаты эксперимента показывают возможность получения несанкционированного доступа к каналу связи и внесения помех в работу системы, оставаясь при этом незамеченным. В идеальных экспериментальных условиях, когда используется проверенное оптическое волокно (нормализующая катушка), рефлектометр позволяет обнаружить ответвления (неоднородности). На разъемных соединениях можно заметить уменьшение сигнала на 0,2-0,4 дБ. Однако при использовании сварных соединений, выявление потерь сигнала становится крайне затруднительным. В условиях фактической эксплуатации, где строительная длина квантового канала редко превышает 800 метров, оптические муфты являются обычным элементом телекоммуникационной сети. Эти муфты и неоднородности волокна увеличивают затухание сигнала, что может маскировать неавторизованные подключения. Рефлектометрический метод в таких условиях не способен различать легитимные и нелегитимные неоднородности.

В качестве контрмер нами предложен метод калибровки станций, который обеспечивает повышенную защиту от несанкционированного доступа. В основе метода лежит использование ослабленных до однофотонного уровня синхроимпульсов. При этом ослабление оптического сигнала осуществляется на кодирующей станции управляемым аттенуатором, а значение затухания рассчитывается таким образом, чтобы на выходе из станции среднее число фотонов в синхроимпульсе составляло 0,1-0,5. В работе [15] приведено детальное описание метода, получены аналитические выражения вероятности обнаружения временного окна, погрешности обнаружения, проведено моделирование. В предлагаемом методе опрос временных интервалов осуществляется последовательно в каждом кадре, т.е. за период следования (T) анализируется один временной интервал. Такой подход позволяет не учитывать время восстановления рабочего режима фотодетектора при расчетах, а при заданных критических значениях среднего числа фотонов в импульсе, частоты появления импульсов темного тока и квантовой эффективности фотокатода, переменным значением является только выборка в каждом временном окне. Импульсы темного тока фотодетектора являются его дробовым шумом, которые могут вызвать лавинный эффект.

Выводы. В статье представлены результаты натурных испытаний действующей системы КРК, которые могут быть полезны другим коллективам для использования в исследованиях. Чем предложенный метод отличается от обрыва ВОЛС? Если злоумышленник повредит оптический кабель (перережет его), система легко это обнаружит. При использовании нашего метода, система не обнаружит нарушителя в квантовом канале, и он будет иметь возможность мешать работе системы в нужные ему моменты времени. Как дополнительная защита от неавторизованных вмешательств, применяется синхронизирующий импульс с изменяемой мощностью (для каждого этапа зондирования). Это, в сочетании с контролируемым уменьшением сигнала, усиливает защиту системы квантовой криптографии от НСД. Исследования показали, что система генерирует импульсы стабильной мощности, не зависящей от длины канала. Простые вычисления необходимой мощности синхронизирующего импульса могут помочь в регулировке мощности источника излучения и создании импульсов нужной мощности, соответствующих длине квантового канала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. Quantum cryptography // *Reviews of Modern Physics*. – 2002. – Vol. 74, No. 1. – P. 145-195.
2. Bennett C.H., Brassard G., & Ekert A.K. Quantum Cryptography // *Scientific American*. – 1992. – 267 (4). – P. 50-57. – <http://www.jstor.org/stable/24939253>.
3. Кулик С. Квантовая криптография // *Фотоника*. – 2010. – № 2. – С. 36-41.
4. Shannon C.E. Communication theory of secrecy systems // in *The Bell System Technical Journal*. – Oct. 1949. – Vol. 28, No. 4. – P. 656-715. – DOI: 10.1002/j.1538-7305.1949.tb00928.x.
5. Vernam G.S. Cipher printing telegraph systems: For secret wire and radio telegraphic communications // *Journal of the AIEE*. – 1926. – 45 (2). – P. 109-115.
6. Deng F.G., & Long G.L. Secure direct communication with a quantum one-time pad // *Physical Review A*. – 2004. – 69 (5). – 052319.
7. Heisenberg W. The physical principles of the quantum theory. Courier Corporation. – 1949.
8. Zhao Y., Fung C.H.F., Qi B., Chen C., & Lo H.K. Quantum hacking: Experimental demonstration of time-shift attack against practical quantum-key-distribution systems // *Physical Review A*. – 2008. – 78 (4). – 042333.
9. Makarov V., & Hjelme D.R. Faked states attack on quantum cryptosystems // *Journal of Modern Optics*. – 2005. – 52 (5). – P. 691-705.
10. Huang J.Z., Weedbrook C., Yin Z.Q., Wang S., Li H.W., Chen W., ... & Han Z.F. Quantum hacking of a continuous-variable quantum-key-distribution system using a wavelength attack // *Physical Review A*. – 2013. – 87 (6). – 062329.
11. Плёткин А.П. Безопасность предварительного этапа процесса синхронизации системы квантового распределения ключей. Информационные технологии // *Радиоэлектроника. Телекоммуникации*. – 2015. – № 5-2. – С. 173-178.
12. Кулик С.П., Молотков С.Н., Маккавеев А.П. Комбинированный фазово-временной метод кодирования в квантовой криптографии // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2007. – Т. 85, № 5-6. – С. 354-359.
13. Pljonkin A., Romyantsev K., Singh P.K. Synchronization in quantum key distribution systems // *Cryptography*. – 2017. – 1, 18. – DOI: 10.3390/cryptography1030018.
14. Курочкин В.Л., Курочкин Ю.В., Зверев А.В., Рябцев И.И., Неизвестный И.Г. Экспериментальные исследования в области квантовой криптографии // *Фотоника*. – 2012. – № 5. – С. 54-66.
15. Румянцев К.Е., Плёткин А.П. Синхронизация системы квантового распределения ключа при использовании фотонных импульсов для повышения защищённости // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2014. – № 8. – С. 81-96.
16. Futuristic Trends in Network and Communication Technologies Third International Conference, FTNCT 2020, Taganrog, 14–16 октября 2020 года. – Taganrog: Springer, 2021. – 533 p. – (Communications in Computer and Information Science; 2; Third International Conference, FTNCT 2020). – ISBN 978-981-16-1483-5.
17. Pljonkin A., Petrov D., Sabantina L., Dakhkilgova K. Nonclassical attack on a quantum keydistribution system // *Entropy*. – 2021. – Vol. 23, No. 5. – DOI: 10.3390/e23050509.
18. Pljonkin A., Romyantsev K. Quantum-cryptographic network // *Proceedings of 2016 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2016, Yerevan, 14–17 октября 2016 года*. – Yerevan: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017. – P. 7807623. – DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807623.
19. Шурупов А.П., Кулик С.П. Квантовое распределение ключа на бифотонах-куквартах с проверочными состояниями // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2008. – Т. 88, № 9-10. – С. 729-733.
20. Финько В.Н., Киселев В.В., Джоган В.К. [и др.]. Концептуальные понятия деятельности по защите информации // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. – 2008. – № 2-1 (18). – С. 144-146.
21. Alshaibi A., Al-Ani M., Al-Azzawi A. [et al.]. The Comparison of Cybersecurity Datasets // *Data*. – 2022. – Vol. 7, No. 2. – DOI: 10.3390/data7020022.

REFERENCES

1. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. Quantum cryptography, *Reviews of Modern Physics*, 2002, Vol. 74, No. 1, pp. 145-195.
2. Bennett C.H., Brassard G., & Ekert A.K. Quantum Cryptography, *Scientific American*, 1992, 267 (4), pp. 50-57. Available at: <http://www.jstor.org/stable/24939253>.
3. Kulik S. Kvantovaya kriptografiya [Quantum cryptography], *Fotonika* [Photonics], 2010, No. 2, pp. 36-41.
4. Shannon C.E. Communication theory of secrecy systems, in *The Bell System Technical Journal*, Oct. 1949, Vol. 28, No. 4, pp. 656-715. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1949.tb00928.x.

5. Vernam G.S. Cipher printing telegraph systems: For secret wire and radio telegraphic communications, *Journal of the AIEE*, 1926, 45 (2), pp. 109-115.
6. Deng F.G., & Long G.L. Secure direct communication with a quantum one-time pad, *Physical Review A*, 2004, 69 (5), 052319.
7. Heisenberg W. The physical principles of the quantum theory. Courier Corporation, 1949.
8. Zhao Y., Fung C.H.F., Qi B., Chen C., & Lo H.K. Quantum hacking: Experimental demonstration of time-shift attack against practical quantum-key-distribution systems, *Physical Review A*, 2008, 78 (4), 042333.
9. Makarov V., & Hjelme D.R. Faked states attack on quantum cryptosystems, *Journal of Modern Optics*, 2005, 52 (5), pp. 691-705.
10. Huang J.Z., Weedbrook C., Yin Z.Q., Wang S., Li H.W., Chen W., ... & Han Z.F. Quantum hacking of a continuous-variable quantum-key-distribution system using a wavelength attack, *Physical Review A*, 2013, 87 (6), 062329.
11. Plenkin A.P. Bezopasnost' predvaritel'nogo etapa protsessa sinkhronizatsii sistemy kvantovogo raspredeleniya klyuchey. Informatsionnye tekhnologii [Security of the preliminary stage of the synchronization process of a quantum key distribution system. Information technologies], *Radioelektronika. Telekommunikatsii* [Radioelectronics. Telecommunications], 2015, No. 5-2, pp. 173-178.
12. Kulik S.P., Molotkov S.N., Makkaveev A.P. Kombinirovannyi fazovo-vremennoy metod kodirovaniya v kvantovoy kriptografii [Combined phase-time coding method in quantum cryptography] *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki* [Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics], 2007, Vol. 85, No. 5-6, pp. 354-359.
13. Pljonkin A., Rumyantsev K., Singh P.K. Synchronization in quantum key distribution systems, *Cryptography*, 2017, 1, 18. DOI: 10.3390/cryptography1030018.
14. Kurochkin V.L., Kurochkin Yu.V., Zverev A.V., Ryabtsev I.I., Neizvestnyy I.G. Eksperimental'nye issledovaniya v oblasti kvantovoy kriptografii [Experimental research in the field of quantum cryptography], *Fotonika* [Photonics], 2012, No. 5, pp. 54-66.
15. Rumyantsev K.E., Plenkin A.P. Sinkhronizatsiya sistemy kvantovogo raspredeleniya klyucha pri ispol'zovanii fotonnykh impul'sov dlya povysheniya zashchishchennosti [Synchronization of a quantum key distribution system using photon pulses to increase security], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 8, pp. 81-96.
16. Futuristic Trends in Network and Communication Technologies Third International Conference, FTNCT 2020, Taganrog, 14–16 октября 2020 года. Taganrog: Springer, 2021, 533 p. – (Communications in Computer and Information Science; 2; Third International Conference, FTNCT 2020). ISBN 978-981-16-1483-5.
17. Pljonkin A., Petrov D., Sabantina L., Dakhkilgova K. Nonclassical attack on a quantum keydistribution system, *Entropy*, 2021, Vol. 23, No. 5. DOI: 10.3390/e23050509.
18. Pljonkin A., Rumyantsev K. Quantum-cryptographic network, Proceedings of 2016 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2016, Yerevan, October 14–17, 2016. Yerevan: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017, pp. 7807623. DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807623.
19. Shurupov A.P., Kulik S.P. Kvantovoe raspredelenie klyucha na bifotonakh-kukvartakh s proverochnymi sostoyaniyami [Quantum key distribution on biphotons-cuquarts with test states], *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki* [Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics], 2008, Vol. 88, No. 9-10, pp. 729-733.
20. Fin'ko V.N., Kiselev V.V., Dzhogan V.K. [i dr.]. Kontseptual'nye ponyatiya deyatelnosti po zashchite informatsii [Conceptual concepts of information security activities], *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], 2008, No. 2-1 (18), pp. 144-146.
21. Alshaibi A., Al-Ani M., Al-Azzawi A. [et al.]. The Comparison of Cybersecurity Datasets, *Data*, 2022, Vol. 7, No. 2. DOI: 10.3390/data7020022.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Н. Целых.

Плѐнкин Антон Павлович – Южный федеральный университет; e-mail: pljonkin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89054592158; кафедра ИБТКС; к.т.н.; доцент.

Pljonkin Anton Pavlovich – Southern Federal University; e-mail: pljonkin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79054592158; the department of information security of telecommunication systems; associate professor.

А.М. Мансур**АЛГОРИТМ НА ОСНОВЕ ТРАНСФОРМЕРОВ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ДЛИННЫХ ТЕКСТОВ**

Статья посвящена актуальной проблеме представления и классификации длинных текстовых документов с использованием трансформеров. Методы представления текста, основанные на трансформерах, не могут эффективно обрабатывать длинные последовательности из-за их процесса самовнимания, который масштабируется квадратично с длиной последовательности. Это ограничение приводит к высокой вычислительной сложности и невозможности применения таких моделей для обработки длинных документов. Для устранения этого недостатка, в статье разработан алгоритм на основе трансформера SBERT, который позволяет построить векторное представление длинных текстовых документов. Ключевая идея алгоритма заключается в применении двух различных процедур к созданию векторного представления: первая основана на сегментации текста и усреднении векторов сегментов, а вторая – на конкатенации векторов сегментов. Такая комбинация процедур позволяет сохранить важную информацию из длинных документов. Для проверки эффективности алгоритма был проведен вычислительный эксперимент на группе классификаторов, построенных на основе предложенного алгоритма, и группе известных методов векторизации текста, таких как TF-IDF, LSA и BoWC. Результаты вычислительного эксперимента показали, что классификаторы на основе трансформеров в целом достигают лучших результатов по точности классификации по сравнению с классическими методами. Однако, это преимущество достигается за счет более высокой вычислительной сложности и, соответственно, более длительного времени обучения и применения таких моделей. С другой стороны, классические методы векторизации текста, такие как TF-IDF, LSA и BoWC, продемонстрировали более высокую скорость работы, что делает их более предпочтительными в случаях, когда предварительное кодирование не допускается и требуется работа в режиме реального времени. Предложенный алгоритм обработки и представления длинных документов доказал свою высокую эффективность и привел к увеличению точности классификации набора данных BBC на 0,5% по критерию F1.

Классификация документов; BERT; трансформеры; механизм внимания; Sentence BERT; TF-IDF; интеллектуальный анализ текста.

A.M. Mansour**A TRANSFORMER-BASED ALGORITHM FOR CLASSIFYING LONG TEXTS**

The article is devoted to the urgent problem of representing and classifying long text documents using transformers. Transformers-based text representation methods cannot effectively process long sequences due to their self-attention process, which scales quadratically with the sequence length. This limitation leads to high computational complexity and the inability to apply such models for processing long documents. To eliminate this drawback, the article developed an algorithm based on the SBERT transformer, which allows building a vector representation of long text documents. The key idea of the algorithm is the application of two different procedures for creating a vector representation: the first is based on text segmentation and averaging of segment vectors, and the second is based on concatenation of segment vectors. This combination of procedures allows preserving important information from long documents. To verify the effectiveness of the algorithm, a computational experiment was conducted on a group of classifiers built on the basis of the proposed algorithm and a group of well-known text vectorization methods, such as TF-IDF, LSA, and BoWC. The results of the computational experiment showed that transformer-based classifiers generally achieve better classification accuracy compared to classical methods. However, this advantage is achieved at the cost of higher computational complexity and, accordingly, longer training and application times for such models. On the other hand, classical text vectorization methods, such as TF-IDF, LSA, and BoWC, demonstrated higher speed, making them more preferable in cases where pre-encoding is not allowed and real-time operation is required. The proposed algorithm has proven its high efficiency and led to an increase in the classification accuracy of the BBC dataset by 0.5% according to the F1 criterion.

Document classification; BERT; transformers; attention mechanism Sentence BERT; TF-IDF; text mining.

Введение. Классификация документов является задачей обработки естественного языка (NLP, Natural Language Processing), которая заключается в присвоении текстовым документам заранее определенных категорий или меток. Это фундаментальная задача в области извлечения информации, и она находит применение в различных областях, включая обнаружение спама, анализ настроений и тематическую категоризацию. Основная цель методов классификации документов заключается в автоматизации организации и индексации больших объемов текстовых данных, что упрощает поиск, извлечение и анализ информации [1, 2].

Для эффективной классификации текста с использованием алгоритмов машинного обучения необходимо преобразовать неструктурированные текстовые данные в формат, который может быть обработан алгоритмами. Этот процесс называется векторизацией текста или извлечением признаков [3, 5]. Выбранный метод представления текста может значительно повлиять на производительность модели классификации.

Традиционные методы классификации документов полагаются на ручную разработку признаков и часто используют алгоритмы контролируемого обучения. Одним из хорошо известных примеров является метод классификации текста на основе правил и шаблонов, который использует заранее определенные критерии, такие как ключевые слова или фразы, для автоматического распределения документов по категориям [1, 7]. Этот подход широко применяется, например, в фильтрах спама для электронной почты. Он определяет категорию документа, основываясь на частоте появления ключевых слов или терминов, часто используя модель «мешок слов», которая представляет текст как набор уникальных слов без учета их порядка или грамматических связей [9]. Несмотря на свою простоту, этот метод классификации может быть эффективным для решения конкретных задач, где заранее известны характерные признаки документов различных категорий.

Современные методы классификации документов используют передовые техники машинного обучения, включая глубокое обучение и модели трансформеров [4]. Эти методы часто используют не контролируемое или полу-контролируемое обучение и могут захватывать более тонкие модели в текстовых данных. Трансформеры, такие как BERT [6] (Bidirectional Encoder Representations from Transformers), революционизировали обработку естественного языка, но они ограничены обработкой текстовых последовательностей до 512 токенов. Это создает проблему для классификации длинных документов, которые часто превышают этот лимит. Исследователи изучали различные методики адаптации BERT для классификации текстов большого объема, включая усечение, разбиение на фрагменты и специализированные архитектуры [8, 10, 11]. В этой статье мы рассмотрим проблему применения BERT к длинным документам и обзор некоторых ключевых подходов, предложенных для решения этой задачи.

Механизм внимания BERT, который является ключевым компонентом его архитектуры, имеет вычислительную сложность, которая растет квадратично с длиной входной последовательности. Это делает вычислительно дорогостоящим применение BERT напрямую к длинным документам. Наивные стратегии усечения, такие как использование только первых 512 токенов, могут привести к потере важной информации. Для эффективного использования полного контекста длинных текстов требуются более сложные методы.

Было исследовано несколько методов для расширения возможностей BERT для классификации текстов большого объема. Один из подходов заключается в разделении документа на более мелкие фрагменты, которые укладываются в лимит в 512 токенов, обработке каждого фрагмента независимо с помощью BERT и последующем агрегировании полученных представлений. Другим вариантом является использование специализированных архитектур трансформеров, таких как Longformer [12] или Big Bird [13], которые были разработаны для более эффективной обработки более длинных последовательностей.

Кроме того, были исследованы методы, такие как текстовое резюмирование, в качестве способа сжатия длинных документов до более управляемого размера перед подачей их в BERT. Извлекая наиболее важную информацию из исходного текста, эти методы

потенциально могут сохранить ключевое содержание, одновременно снижая вычислительную нагрузку. Однако результат классификации будет зависеть от эффективности процесса реферирования текста, и нельзя игнорировать дополнительные вычислительные затраты, необходимые для резюмирования текста.

В подтверждение этого теоретического анализа в этой статье представляется алгоритм классификации, который использует кодирование BERT для представления текста. Алгоритм характеризуется применением двух различных процедур для представления документа. Первая процедура включает в себя разделение документа на текстовые сегменты длиной 512 (максимально допустимый размер для входных данных BERT). Затем документ представляется как среднее значение векторов сегментов. Вторая процедура основана на предположении, что важная информация в документе часто сосредоточена в начале и заключении. Эта процедура учитывает кодирование первых и последних 512 токенов документа и представляет документ как вектор, полученный путем конкатенации двух векторов сегментов. Таким образом, основные вклады в эту работу:

1. Алгоритм представления текстовых документов в виде векторов с использованием двух разных процедуры: первая следует методу сегментации текста и усреднения векторов, а вторая – конкатенация векторов.

2. Программное приложение для классификации документов с использованием предложенного представления документов и проведения вычислительного эксперимента¹ по набору канонических методов.

1. Аналитический обзор методов векторизации текстов на основе Трансформеров. Трансформеры (англ. *Transformers*): Архитектура трансформеров, представленная [4], революционизировала обработку естественного языка. Модели, такие как BERT [6] и GPT [14] (Generative Pre-trained Transformer), достигли состояния искусства в различных задачах NLP, включая классификацию документов. Эти модели могут захватывать контекстуальные представления текста, что позволяет более точно и тонко классифицировать документы. Архитектура трансформеров особенно эффективна для классификации документов благодаря своей способности обрабатывать текст последовательно и параллельно, захватывая как местные, так и глобальные зависимости в данных.

BERT – это модель языкового представления на основе архитектуры трансформера [6, 19]. *BERT* предназначен для предварительного обучения глубоких двунаправленных представлений, что позволяет ему учитывать контекст с обеих сторон токена при его кодировании. Это отличается от предыдущих моделей, таких как *ELMo* [15], которые только однонаправленны. *BERT* использует блоки трансформеров, каждый из которых содержит слой многоголовой внимания и слой *feed-forward neural network*. Вход для *BERT* – это последовательность токенов, для представления каждого из которых *BERT* комбинирует векторные представления токенов, сегментов и позиций.

BERT предварительно обучается на двух неопределенных задачах: маскированном языковом моделировании (MLM, Masked Language Modeling) [22] и предсказании следующего предложения (NSP, Next Sentence Prediction) [21]. При MLM 15% входных токенов случайно маскируются, и модель должна предсказать оригинальный идентификатор лексемы маскированного токена на основе контекста. В задаче NSP по двум предложениям модель предсказывает, следует ли второе предложение за первым в исходном тексте. Эти цели предварительного обучения позволяют *BERT* уметь контекстуальные представления слов и понимать отношения между предложениями.

После предварительного обучения на больших неопределенных данных *BERT* может быть точным обучением на конкретных задачах, добавляя простой выходной слой. Этот процесс точного обучения требует намного меньше маркированных данных и изменений в архитектуре, специфичных для задачи, по сравнению с обучением модели с нуля.

¹ Ссылка на реализацию программы на GitHub [https://github.com/Ali-MH-Mansour/ Document-classification/blob/main/Document_classification_BERT.ipynb](https://github.com/Ali-MH-Mansour/Document-classification/blob/main/Document_classification_BERT.ipynb).

BERT продемонстрировал лучшие результаты на различных задачах NLP, включая вопросно-ответную систему, вывод на основе языка, классификацию текста, определение именованных сущностей и анализ настроений.

Sentence-BERT (SBERT) [16] – это модификация предварительно обученной сети BERT, которая использует архитектуры сиамских и триплетных сетей для создания встраиваний предложений, которые можно эффективно сравнивать с помощью косинусного сходства.

Архитектура SBERT модифицирует оригинальную модель BERT, удаляя финальный классификационный слой и включая сиамскую архитектуру. Во время обучения SBERT обрабатывает пары предложений, при этом каждая подсеть BERT генерирует обобщенные встраивания предложений. Эти встраивания затем сравниваются с использованием косинусного сходства для получения оценки сходства. Сиамские сети состоят из двух или более идентичных подсетей с общими параметрами. Они широко используются в задачах, требующих сравнения, таких как поиск похожих предложений. SBERT использует триплетные потери, когда сеть обучается на якорь, положительной паре и отрицательной паре, что значительно снижает вычислительную нагрузку.

По сравнению с BERT, SBERT имеет ряд преимуществ. BERT требует совместной обработки обоих предложений в паре, что приводит к высокой вычислительной нагрузке. Например, поиск самой похожей пары из 10 000 предложений потребовал бы 50 миллионов вычислений вывода (~65 часов) с BERT. SBERT сокращает это время до около 5 секунд для вычисления встраиваний и 0,01 секунды для расчета косинусного сходства [17].

SBERT превосходит BERT в задачах семантического поиска, требующих нахождения предложений со схожими значениями. Он полезен для выявления аргументов с похожими темами и рассуждениями на различные темы. SBERT можно использовать для вычисления встраиваний предложений или проведения поиска по семантическому сходству с помощью простой библиотеки на Python.

В целом, SBERT значительно улучшает понимание предложений по сравнению с BERT, включая архитектуры сиамских и триплетных сетей. Его эффективное вычисление встраиваний предложений делает его идеальным для задач семантического поиска и других задач обработки естественного языка на уровне предложений.

2. Постановка задачи. Задача классификации документов может быть сформулирована следующим образом:

Пусть имеется множество документов $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{|D|}\}$ и множество категорий (классов) $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{|C|}\}$. Существует неизвестная целевая функция $\Phi: D \times C \rightarrow \{0, 1\}$, которая сопоставляет каждому документу и категории значение 1, если документ относится к этой категории, и 0 в противном случае. Задача состоит в построении функции Φ' , максимально близкой к Φ , то есть функции, которая корректно классифицирует документы по категориям. Для решения этой задачи используются методы машинного обучения, которые опираются на наличие коллекции заранее классифицированных документов $\Omega = \{d_1, d_2, \dots, d_{|\Omega|}\}$.

Тогда задача состоит в нахождении такой функции Φ' , которая минимизирует суммарные потери на коллекции Ω :

$$\min_{\Phi'} \sum_{d \in \Omega} L(\Phi(d), \Phi'(d)),$$

где $L(\Phi(d), \Phi'(d))$ – функция потерь, оценивающая качество аппроксимации Φ' относительно Φ для документа d .

3. Реализация алгоритмов классификации документов. Предлагаемый алгоритм характеризуется применением двух различных процедур для представления документа. Ниже представлена идея каждого из них с подробным объяснением шагов.

Первая процедура включает в себя разделение документа на текстовые сегменты фиксированной длиной. Поскольку модель BERT принимает текстовую последовательность ограниченной длины 512 токенов, алгоритм делит текст документа на сегменты

длиной 512. Затем создается векторное представление каждого сегмента. Документ представляется как среднее значение векторов сегментов. Процесс векторного усреднения создает вектор центроида документа, который представляет документ лучше, чем просто представление первых 512 токенов и усечение остальных.

Векторы центроидов используются в качестве входных данных для классификатора, который, в свою очередь, определяет класс документа по заданному алгоритму. Ниже приведен псевдокод алгоритма с применением первой процедуры.

Алгоритм с применением процедуры усреднения векторов

```

1 Ввод: список документов  $D$ 
2 Вывод: векторное представление документов
3 Инициализировать пустой словарь  $document\_embeddings = \{\}$ 
4 Инициализировать максимальную длину сегментов  $L=512$ 
5 Загрузить предварительно обученную модель BERT.
6 For each  $d$  in the documents list  $D$  do:
8   Разделить документ на сегменты длиной `L` (за исключением последнего
   сегмента, который может быть короче).
   Игнорировать сегменты, размер которых меньше порогового значения
   сохранять сегменты в списке  $S$ 
    $segment\_embeddings = []$  // Инициализировать пустой список
   `segment_embeddings` для хранения векторных представлений сегментов
   For each segment in  $S$  do:
      $Vector = BERT(segment)$  //Получить векторное представление сегмента,
     используя модель BERT.
      $segment\_embeddings [] \leftarrow vector$  // добавить вектор в список
   End for
    $document\_vector = mean(segment\_embeddings)$  // Вычислить среднее значение
   векторов сегментов, чтобы получить векторное представление всего
   документа.
    $document\_embeddings[doc\_id] = document\_vector$  // Добавить вектор
   документа в словарь  $document\_embeddings$ , используя идентификатор
   документа в качестве ключа
End for
Return словарь  $document\_embeddings$ 

```

Алгоритм начинается с инициализации пустого словаря $document_embeddings$, который будет использоваться для хранения векторных представлений документов. Затем устанавливается максимальная длина сегментов $L=512$, которая будет использоваться при разделении документов на части. После этого загружается предварительно обученная модель BERT, которая будет применяться для кодирования сегментов документов в векторные представления.

Далее алгоритм переходит к обработке каждого документа d из входного списка D . Для каждого документа он разделяется на сегменты длиной L , за исключением последнего сегмента, который может быть короче. Все сегменты сохраняются в списке S . Затем для каждого сегмента в списке S используется модель BERT для получения векторного представления. Все векторы сегментов сохраняются в списке $segment_embeddings$. После обработки всех сегментов вычисляется среднее значение векторов сегментов, чтобы получить векторное представление всего документа. Это векторное представление документа добавляется в словарь $document_embeddings$, используя идентификатор документа в качестве ключа.

Применение процедуры конкатенации векторов. Вводные и заключительные разделы документа часто включают в себя основные термины и ключевые слова, относящиеся к теме документа. В большинстве случаев эти ключевые слова предоставляют достаточно информации для точной категоризации документа. Второй алгоритм учитывает это предположение, рассматривая только векторные представления начального и

конечного сегментов документа (512 токенов каждого). Тогда документ представляется как вектор, полученный объединением (конкатенации) двух векторов сегментов. Именно это отличает предложенный алгоритм от других, так как первого и последнего разделов достаточно, чтобы размерности не становились слишком большими, что отрицательно влияет на эффективность классификатора. Ниже приведен псевдокод алгоритма с применением второй процедуры.

Алгоритм с применением процедуры конкатенации векторов

```

1 Ввод: список документов  $D$ 
2 Вывод: векторное представление документов
3 Инициализировать пустой словарь  $document\_embeddings = \{\}$ 
4 Инициализировать максимальную длину сегментов  $L$  // по умолчанию  $L=512$ 
5 Load the BERT model
6 For each  $d$  in the documents list  $D$  do:
8    $First = d[:L]$  //Получить первые 512 токенов
    $Last = d[-L:]$  //Получить последние 512 токенов
    $vector1, vector2 = BERT([First, Last])$  //закодировать первый и последний сегмент с использованием модели BERT
    $document\_vector = concatenate(vector1, vector2)$  // объединить векторы первого и последнего сегмента, чтобы получить вектор документа
    $document\_embeddings[doc\_id] = document\_vector$  // Добавить вектор документа в словарь  $document\_embeddings$ , используя идентификатор документа в качестве ключа
End for
Return словарь  $document\_embeddings$ 

```

4. Вычислительный эксперимент и анализ полученных результатов. Эффективность предложенных алгоритмов оценивалась и сравнивалась с несколькими основными методами, включая TF-IDF, *BoWC*, *BERT* и *LSA*, которые кратко описаны ниже.

Метод TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency) – это статистический подход к оценке важности слова в контексте документа или корпуса документов. Он вычисляется как произведение частоты слова в документе (TF) и обратной частоты этого слова во всем корпусе (IDF), что позволяет выделить наиболее значимые термины для представления содержания документа.

Метод BoWC (*bag of weighted concepts*) – это расширение традиционной модели мешка слов, которое учитывает семантическую информацию о концептах, представленных в тексте. Вместо простого подсчета частоты слов, *BoWC* использует веса, основанные на семантической близости концептов, извлеченных из анализируемых текстов. Это позволяет лучше отразить смысловое содержание документа и повысить эффективность задач классификации текстов.

Метод LSA (*Латентно-семантический анализ*) – это метод обработки текстовой информации, основанный на гипотезе распределения и использовании сингулярного разложения для выявления скрытых взаимосвязей между терминами и концепциями в наборе документов. *LSA* позволяет представить текст в виде латентных признаков меньшей размерности, чем пространство слов, что помогает в задачах информационного поиска и автоматической категоризации документов.

Для проведения эксперимента использовался набор данных *BBC* [18] который включает 2225 документов, полученных с веб-сайта новостей *BBC*, охватывающих новостные истории по пяти различным тематическим областям за период 2004-2005 гг.

Метрика оценки. Для оценки производительности алгоритмов классификации текста используется метрика оценки F-мера [20]. Это среднее гармоническое между точностью и полнотой, которое определяется следующими формулами:

$$Precision_{C_i} = \frac{TP_{C_i}}{TP_{C_i} + FP_{C_i}}, \quad (1)$$

$$Recall_{C_i} = \frac{TP_{C_i}}{TP_{C_i} + FN_{C_i}}, \quad (3)$$

$$F - score = \frac{(1 + \beta) \cdot Precision_{C_i} \cdot Recall_{C_i}}{\beta \cdot Precision_{C_i} + Recall_{C_i}}. \quad (4)$$

Здесь C – это метка класса, TP (True Positive) – это количество документов, правильно отмеченных классификатором как относящиеся к классу C , а FP (False Positive) – это количество документов, неправильно отмеченных классификатором как относящиеся к классу C . Между тем, FN (False Negative) ложноотрицательный – это количество документов, которые относятся к классу C и которые классификатор ошибочно определил как не относящиеся к классу C , а TN (True Negative) – это количество документов, не принадлежащих к классу C , правильно отмеченных классификатором как не относящиеся к классу C . Коэффициент β позволяет настраивать баланс между точностью и полнотой алгоритма кластеризации. Значение $\beta > 1$ делает акцент на точности, а $\beta < 1$ – на полноте. По умолчанию $\beta = 1.0$.

Реализация и анализ результатов. Для реализации алгоритмов, основанных на BERT, была использована модель SBERT. Библиотека LSA из *Scikit-learn*² была применена, при этом размерность векторов была установлена равной 300. Для TF-IDF и BoWC реализация была выполнена в точности, как описано в предыдущей работе автора [3].

Векторы, сгенерированные вышеупомянутыми методами, использовались в качестве входных данных для нескольких классификаторов, включая: метод опорных векторов (SVM) с различными ядрами (полиномиальное Poly (P), радиальная базисная функция RBF (R), линейное Linear (L)), классификатор на основе искусственной нейронной сети (ANN) и классификатор ближайших соседей (K-Nearest Neighbors, KNN). Для реализации классификаторов также применялась библиотека Scikit-learn. Для нейросетевого классификатора использовался многослойный перцептрон (Multi-Layer Perceptron, MLP) с настройками по умолчанию и 500 итерациями обучения. Количество ближайших соседей было установлено равным 5, что соответствует количеству классов документов в стандартном наборе данных.

Результаты вычислительного эксперимента представлены в табл. 1 и на рис. 1. В целом, можно наблюдать, что алгоритмы, основанные на BERT, достигают наилучших результатов со всеми классификаторами.

Таблица 1

Точность классификации, измеренная по F1

Методы	SVM (P)	SVM (R)	SVM (L)	ANN	KNN
SBERT _{базовый (768)}	97,60	98,05	97,30	97,30	96,40
SBERT _{усреднения векторов (768)}	98,2	98,50	98,05	98,05	97,00
SBERT _{конкатенации векторов (1536)}	97,30	98,05	98,95	98,35	97,30
TF-IDF ₍₄₅₉₀₎	87,40	97,70	98,20	97,90	94,10
LSA ₍₃₀₀₎	97,30	97,75	97,60	98,20	94,60
BoWC ₍₂₀₀₎	98,2	97,75	97,60	97,03	97,30

Эксперимент также подтверждает, что два предложенных алгоритма превосходят базовое кодирование BERT (С кодированием только первых 512 токенов). Использование конкатенации векторов первого и последнего текстовых сегментов для представления всего документа достигает наилучшего результата, поскольку добавляет дополнительную различительную информацию к представлению документа. Усреднение векто-

² Библиотеку можно посмотреть по URL [scikit-learn: machine learning in Python](https://scikit-learn.org/stable/) — scikit-learn 1.5.1 documentation.

ров параграфов документа (каждый длиной 512) достигают более высокой точности, чем базовый BERT, но ниже, чем конкатенация. Это имеет смысл, потому что по мере увеличения длины вектора со более плотными признаками, точность классификации увеличивается, но вычислительные затраты также возрастают.



Рис. 1. Результаты классификации набора данных ВВС, измеренные мерой F1

Также заметим, что классификатор с линейным ядром в алгоритме конкатенации векторов «S-BERT_{конкатенации векторов}» достиг наилучшего результата классификации набора данных ВВС. Причина в том, что конкатенация векторов означает увеличение количества признаков (размерностей), что делает нелинейные ядра менее эффективными из-за «проклятия размерности».

Важно отметить, что базовое кодирование BERT не превосходит традиционные методы, такие как TF-IDF и LSA. Более того, метод BoWC достиг более высокой точности классификации, чем базовый BERT в сочетании с полиномиальным ядром SVM. Это указывает на то, что в некоторых случаях традиционные подходы могут быть более эффективными, чем современные методы на основе нейронных сетей, особенно когда последние требуют больших вычислительных ресурсов.

Относительно временных затрат, ссылаясь на табл. 2, заметим, что кодирование набора данных из 2225 документов заняло 5111.59 секунд, в то время как TF-IDF был гораздо быстрее (2,45 секунды). Время выполнения для каждого метода колеблется в зависимости от используемого классификатора и характеристик входных векторов. При одновременном учете скорости и точности метод TF-IDF, как правило, обеспечивает наилучшую общую производительность.

Таблица 2

Сравнение времени представления документов разными методами

	Vectorization time	SVM	ANN	KNN
S-BERT_{базовый} (768)	1050.55	5.72	6.22	0.13
S-BERT_{усреднения векторов} (768)	5111.59	6.01	6	0.11
S-BERT_{конкатенации векторов} (1536)	2108	18.9	11	0.44
TF-IDF₍₄₅₉₀₎	2.45	20.4	18	21.1
BoWC₍₂₀₀₎	1887	0.991	13.3	0.1
LSA₍₃₀₀₎	2.11	2.33	7.36	0.8

В будущем планируется расширить эксперименты и усилить результаты на других наборах данных. Также планируется протестировать большие языковые модели в классификации документов, для которых существующие методы не смогли определить правильный класс.

Заключение. В данной работе представлен эффективный алгоритм классификации длинных текстовых документов на основе трансформера SBERT. Проведенное исследование продемонстрировало, что предложенный алгоритм превосходит по точности классификации классификаторы, основанные на классических методах векторизации текстов, таких как TF-IDF, *LSA* и *BoWC*. Несмотря на то, что классификаторы на базе трансформеров показали лучшие результаты в целом, они уступают классическим методам по скорости работы. Поэтому традиционные подходы остаются предпочтительными в приложениях, где необходима сверхбыстрая обработка текстов в режиме реального времени без предварительного кодирования. Предложенный алгоритм может быть применен в различных областях, таких как анализ тональности, извлечение сущностей и ключевых фраз, а также в других задачах обработки естественного языка, где необходимо работать с длинными текстовыми последовательностями. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию алгоритма для повышения скорости обработки и расширение его применения на другие задачи обработки естественного языка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Kadhim A.I.* Survey on supervised machine learning techniques for automatic text classification, *Artificial Intelligence Review*, 2019, Vol. 52, No. 1, pp. 273-292.
2. *Minaee S., Kalchbrenner N., Cambria E., Nikzad N., Chenaghlu M., Gao J.* Deep learning-based text classification: A comprehensive review, *arXiv preprint arXiv:03705*, 2020.
3. *Mansour A., J.M. and Y.K.* Text Vectorization Method Based on Concept Mining Using Clustering Techniquesm 2022 VI International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino). IEEE, 2022, pp. 1-10.
4. *Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., Kaiser Ł., Polosukhin I.* Attention is all you need, *Advances in neural information processing systems*, 2017, Vol. 30.
5. *Mansour A.M., Mohammad J.H., Kravchenko Y.A.* Text vectorization using data mining methods, *Izvestia SFedU. Technical science*, 2021, No. 2.
6. *Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K.* Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding, *arXiv preprint arXiv:04805*, 2018.
7. *Ni P., Li Y., Chang V.* Research on text classification based on automatically extracted keywords, *International Journal of Enterprise Information Systems (IJEIS)*, 2020, Vol. 16, No. 4, pp. 1-16.
8. *Grootendorst M., Vanschoren J.* Beyond Bag-of-Concepts: Vectors of Locally Aggregated Concepts, *Joint European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*. Springer, 2019, pp. 681-696.
9. *Qader W.A., Ameen M.M., Ahmed B.I.* An overview of bag of words; importance, implementation, applications, and challenges, *2019 International Engineering Conference (IEC)*. IEEE, 2019, pp. 200-204.
10. *Kim H.K., Kim H., Cho.* Bag-of-concepts: Comprehending document representation through clustering words in distributed representation, *Neurocomputing*, 2017, Vol. 266, pp. 336-352.
11. *Rücklé A., Eger S., Peyrard M., Gurevych I.* Concatenated power mean word embeddings as universal cross-lingual sentence representations, *arXiv preprint arXiv:01400*, 2018.
12. *Beltagy I., Peters M.E., Cohan A.* Longformer: The long-document transformer, *arXiv preprint arXiv:05150*, 2020.
13. *Zaheer M., Guruganesh G., Dubey K.A., Ainslie J., Alberti C., Ontanon S., Pham P., Ravula A., Wang Q., Yang L.* Big bird: Transformers for longer sequences, *Advances in neural information processing systems*, 2020, Vol. 33. Big bird, pp. 17283-17297.
14. *Floridi L., Chiriatti M.* GPT-3: Its Nature, Scope, Limits, and Consequences, *Minds and Machines*, 2020, Vol. 30. GPT-3. No. 4, pp. 681-694.
15. *Ethayarajah K.* How Contextual are Contextualized Word Representations? Comparing the Geometry of BERT, ELMo, and GPT-2 Embeddings, *How Contextual are Contextualized Word Representations?*, 2019.
16. *Reimers N., Gurevych I.* Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks, *arXiv preprint arXiv*, 2019, Vol. abs/1908.10084.
17. Decoding Sentence-BERT | Continuum Labs. Available at: <https://training.continuumlabs.ai/knowledge/vector-databases/decoding-sentence-bert> (accessed 06 July 2024).
18. *Greene, D., Cunningham P.* Practical solutions to the problem of diagonal dominance in kernel document clustering, *Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning*, 2006, pp. 377-384.

19. *Adhikari A., Ram A., Tang R., Lin J.* Docbert: Bert for document classification, *arXiv preprint arXiv:08398*, 2019.
20. *Sabbah T., Selamat A., Selamat M.H., Al-Anzi F.S., Viedma E.H., Krejcar O., Fujita H.* Modified frequency-based term weighting schemes for text classification, *Applied Soft Computing*, 2017, Vol. 58, pp. 193-206.
21. *Sun Y., Zheng Y., Hao C., Qiu H.* NSP-BERT: A Prompt-based Few-Shot Learner Through an Original Pre-training Task Next Sentence Prediction, 2022. NSP-BERT.
22. *Wettig A., Gao T., Zhong Z., Chen D.* Should You Mask 15% in Masked Language Modeling?, *arXiv preprint arXiv:2202.08005*, 2022.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. С.Г. Буланов.

Мансур Али Махмуд – Южный федеральный университет; e-mail: mansur@sfedu.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 89880158697; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

Mansour Ali Mahmoud – Southern Federal University; e-mail: mansur@sfedu.com; Taganrog, Russia; phone: +79880158697; the Department of Computer Aided Design; graduate student.

Раздел III. Моделирование процессов и систем

УДК 621.372.632

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-197-207

А.А. Марьев

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КВАДРАТУРНОГО СТРОБОСКОПИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Работа относится к области радиосвязи и посвящена анализу функционирования квадратурного стробоскопического преобразователя частоты, который в настоящее время широко применяется в системах программно-определяемого радио, реализованных по принципу приемника прямого преобразования. Такая структура приемника сочетает в себе ряд важных для практической реализации достоинств, таких как высокая адаптивность, простота изменения конфигурации демодулятора, простота аппаратной части приемника и низкая стоимость компонентов. Несмотря на сравнительно широкое распространение квадратурных стробоскопических преобразователей, вопросы их теоретико-сигнального анализа и оптимизации параметров по критериям, характерным для типовых задач радиосвязи, недостаточно освещены в открытых источниках. Известные сложности имеются также и в выборе терминологии, в связи с чем в работе приводится несколько наиболее распространенных в литературе наименований устройств рассматриваемого типа. В основной части работы предлагается достаточно простая математическая модель квадратурного стробоскопического преобразователя частоты, основанная на ряде упрощающих допущений. В то же время, указанные допущения не уменьшают общности полученных результатов. На основе предложенной модели выполняется оценка коэффициента передачи преобразователя частоты. Помимо исследования идеализированной математической модели, в которой переключения считаются мгновенными, производится исследование влияния конечного времени коммутации на коэффициент передачи преобразователя частоты. Для выполнения анализа используется математический аппарат теории сигналов. Предложенная в работе модель стробоскопического преобразователя частоты допускает дальнейшее усложнение и использование для исследования влияния дополнительных факторов на характеристики радиотехнических систем, имеющих рассматриваемую архитектуру. В частности, возможно исследование влияния кратковременной нестабильности (джиттера) периода переключений ключа, а также влияния неидентичности параметров квадратурных каналов. Полученные аналитические выражения и приведенные графики исследованных зависимостей могут быть полезны при проектировании систем радиосвязи различного назначения, в которых используется квадратурный стробоскопический преобразователь частоты.

Детектор Тейло; квадратурный преобразователь частоты; стробоскопический преобразователь частоты; приемник прямого преобразования; программно-определяемое радио.

А.А. Maryev

MATHEMATICAL MODEL OF A QUADRATURE SAMPLING FREQUENCY CONVERTER

The work relates to the field of radio communications and is devoted to the analysis of the functioning of a quadrature stroboscopic frequency converter, which is now widely used in software-defined radio systems, implemented on the principle of direct conversion receiver. This receiver structure combines a number of advantages which are important for practical realization, such as high adaptivity, ease of changing the demodulator configuration, simplicity of the receiver hardware and low cost of components. Despite the relatively widespread use of quadrature stroboscopic converters, the topics of their signal-theoretic analysis and optimization of parameters by criteria characteristic of typical radio communication tasks are not sufficiently covered in literature. There are also known difficulties in the choice of terminology, that's why the paper contains some of the most common in the names used for devices of the

considered type. In the main part of the paper a rather simple mathematical model of a quadrature stroboscopic frequency converter based on a number of simplifying assumptions is proposed. At the same time, these assumptions do not reduce the generality of the obtained results. Based on the proposed model, the estimation of the frequency converter gain is performed. In addition to the study of the idealized mathematical model, in which switching is considered instantaneous, the influence of the finite switching time on the frequency converter gain is investigated. The mathematical apparatus of signal theory is used to perform the analysis. The model of the stroboscopic frequency converter proposed in the paper allows further complication and use to study the influence of additional factors on the characteristics of radio systems based on this architecture. In particular, it is possible to study the influence of short-term instability (jitter) of the switching period of the key, as well as the influence of non-identity of the parameters of quadrature channels. The obtained analytical expressions and the given graphs of the investigated dependencies can be useful in the design of radio communication systems for various purposes, in which a quadrature stroboscopic frequency converter is used.

Taylor detector, quadrature sampling detector, direct conversion receiver, software-defined radio.

Введение. В современных системах программно-определяемого радио (Software-Defined Radio, SDR) [1–3] получила распространение архитектура приемника прямого преобразования [4], в которой гетеродин настроен на частоту несущей, и преобразователь частоты выполняет перенос спектра сигнала на нулевую несущую, то есть выделяет квадратурные составляющие (комплексную огибающую). При этом аналоговая часть приемника оказывается достаточно простой, а требуемая частота дискретизации аналого-цифровых преобразователей – минимальной. Перечисленные достоинства определили широкое применение архитектуры приемника прямого преобразования в устройствах интернета вещей (Internet of Things, IoT), недорогих радиоприемниках и трансиверах, подключаемых к персональному компьютеру по интерфейсу USB, а также в радиолюбительских конструкциях [5–7].

Центральным узлом SDR-приемника прямого преобразования является преобразователь частоты. Одним из наиболее популярных решений является так называемый квадратурный стробоскопический детектор (Quadrature Sampling Detector, QSD), известный также под названием «детектор Тейло» (Taylor detector) [8–11], который сочетает в себе конструктивную простоту, доступность компонентов и высокие характеристики. Этот узел, по существу, выполняет функции преобразователя частоты, поэтому далее будем называть его квадратурным стробоскопическим преобразователем частоты [12, 13].

В 2003 Д. Тейло опубликовал работу [9], в которой был описан квадратурный стробоскопический преобразователь частоты, однако до настоящего времени вопросы теоретического анализа работы этого устройства недостаточно освещены в публикациях. Целью данной работы является частичное заполнение этого пробела.

Ниже предложены упрощенная схема и математическая модель квадратурного преобразователя частоты, с помощью которых будет произведен анализ его функционирования с точки зрения теории сигналов.

Схема преобразователя частоты. На рис. 1 приведена упрощенная схема замещения квадратурного стробоскопического преобразователя частоты.

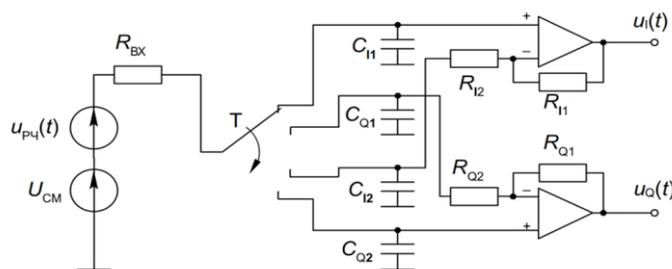


Рис. 1. Упрощенная схема замещения квадратурного стробоскопического преобразователя частоты

На вход схемы воздействует узкополосный радиосигнал

$$u_{pч}(t) = A(t)\cos(\omega_0 t + \theta(t)), \quad (1)$$

где $A(t)$ – огибающая амплитуд радиосигнала, соответствующая закону амплитудной модуляции;

$\theta(t)$ – набег фазы, соответствующий закону угловой модуляции.

Второй источник ЭДС в схеме создает постоянное напряжение смещения U_{CM} .

Основным элементом схемы является ключ, который последовательно подключает сопротивление R_{BX} к емкостям C_{I1} , C_{Q1} , C_{I2} , C_{Q2} , C_{I1} и так далее. Переключение выполняется через равные интервалы T , ключ управляется импульсными сигналами тактового генератора.

Емкости C_{I1} и C_{I2} подключены соответственно к неинвертирующему и инвертирующему входам операционного усилителя, который выполняет усиление сигнала и согласование преобразователя частоты с последующим каскадом приемника (обычно это аналого-цифровой преобразователь).

Аналогичным образом емкости C_{Q2} и C_{Q1} подключены ко входам второго операционного усилителя.

На выходе первого операционного усилителя формируется сигнал, пропорциональный синфазной составляющей:

$$u_I(t) = k_{ПЧ}k_y I(t) = k_{ПЧ}k_y A(t)\cos\theta(t), \quad (2)$$

где $k_{ПЧ}$ – коэффициент передачи преобразователя частоты (без усилителя);

k_y – коэффициент усиления согласующего каскада на операционном усилителе.

На выходе второго операционного усилителя формируется сигнал, пропорциональный квадратурной составляющей:

$$u_Q(t) = k_{ПЧ}k_y Q(t) = k_{ПЧ}k_y A(t)\sin\theta(t). \quad (3)$$

Для правильной работы схемы необходимо обеспечить идентичность характеристик квадратурного и синфазного каналов, поэтому коэффициенты $k_{ПЧ}$ и k_y в двух каналах одинаковы.

Математическая модель преобразователя частоты. Примем $k_y = 1$ и рассмотрим стробоскопический квадратурный преобразователь частоты как устройство, состоящее из двух блоков: комплексного смесителя (перемножителя) C и фильтра нижних частот ФНЧ (рис. 2).

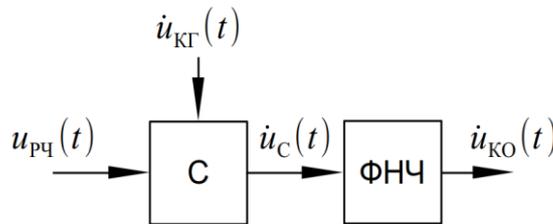


Рис. 2. Структурная схема упрощенной модели комплексного стробоскопического преобразователя частоты

Для упрощения анализа исключим из рассмотрения взаимовлияние ФНЧ и смесителя. Ниже будет показано, что это допущение приводит к занижению оценки $k_{ПЧ}$ в 2 раза, по сравнению с приближенными оценками, приведенными для наилучшего случая в опубликованных работах [9, 11].

Смеситель выполняет умножение входного радиосигнала $u_{pч}(t)$ на комплексное колебание генератора $i_{кГ}(t)$, состоящее из прямоугольных импульсов длительностью T :

$$i_{кГ}(t) = e^{-j\frac{\pi m}{2}}, mT \leq t < (m + 1)T, m \in \mathbb{Z}. \quad (4)$$

Источник колебания $\dot{u}_{кГ}(t)$ играет роль гетеродина, однако форма колебания не гармоническая, поэтому использован термин «генератор».

Период $T_{кГ}$ колебания $\dot{u}_{кГ}(t)$ равен $4T$, форму колебания поясняет рис. 3.

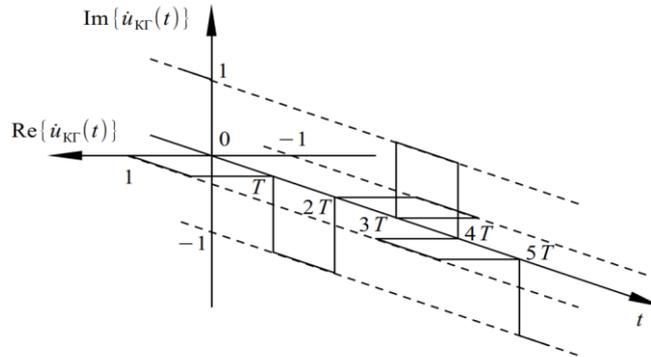


Рис. 3. Комплексное колебание генератора

Следует отметить, что в реальном стробоскопическом преобразователе частоты колебание $\dot{u}_{кГ}(t)$ не формируется, и умножение на него является лишь удобной для анализа математической моделью переключений ключа.

На выходе смесителя формируется комплексный сигнал

$$\dot{u}_C(t) = u_{рч}(t)\dot{u}_{кГ}(t), \tag{5}$$

который обрабатывается фильтром нижних частот с вещественной импульсной характеристикой $h_{ФНЧ}(t)$. Отклик фильтра определяется сверткой вида:

$$\dot{u}_{КО}(t) = \dot{u}_C(t) * h_{ФНЧ}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{u}_C(\tau) h_{ФНЧ}(t - \tau) d\tau. \tag{6}$$

Спектр сигнала на выходе преобразователя частоты. Получим выражение для спектральной плотности сигнала на выходе исследуемого преобразователя частоты.

Спектральная плотность радиосигнала $S_{рч}(j\omega)$ определяется прямым преобразованием Фурье:

$$S_{рч}(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} u_{рч}(t) e^{-j\omega t} dt = F\{u_{рч}(t)\}. \tag{7}$$

По теореме о спектре произведения сигналов [4] спектральная плотность комплексного произведения равна свертке спектральной плотности $S_{рч}(j\omega)$ радиосигнала и спектральной плотности $S_{кГ}(j\omega)$ комплексного колебания генератора:

$$S_C(j\omega) = S_{кГ}(j\omega) * S_{рч}(j\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{кГ}(jx) S_{рч}(j[\omega - x]) dx. \tag{8}$$

Для определения $S_{кГ}(j\omega)$ представим колебание $\dot{u}_{кГ}(t)$ в виде свертки

$$\dot{u}_{кГ}(t) = u_{И}(t) * \dot{u}_\delta(t), \tag{9}$$

где $u_{И}(t) = 1, 0 \leq t < T$ – одиночный прямоугольный видеоимпульс;

$\dot{u}_\delta(t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} e^{-j\frac{\pi m}{2}} \delta(t - mT)$ – последовательность дельта-функций.

Спектральная плотность последовательности дельта-функций определяется выражением [15]:

$$S_\delta(j\omega) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} 2\pi \dot{C}_n \delta(\omega - n\Omega_{кГ}), \tag{10}$$

где \dot{C}_n – коэффициенты разложения колебания $u_\delta(t)$ в ряд Фурье в базисе комплексных гармонических функций;

$\Omega_{кГ} = \frac{2\pi}{T_{кГ}}$ – угловая частота колебания $u_\delta(t)$ (и колебания $\dot{u}_{кГ}(t)$).

Найдем коэффициенты \dot{C}_n :

$$\begin{aligned}\dot{C}_n &= \frac{1}{T_{\text{КГ}}} \int_0^{T_{\text{КГ}}} \dot{u}_\delta(t) e^{-jn\Omega_{\text{КГ}}t} dt = \frac{1}{T_{\text{КГ}}} \int_0^{T_{\text{КГ}}} \sum_{m=0}^3 e^{-j\frac{\pi m}{2}} \delta(t - mT) e^{-jn\Omega_{\text{КГ}}t} dt = \\ &= \frac{1}{T_{\text{КГ}}} \sum_{m=0}^3 e^{-j\frac{\pi m}{2}} \int_0^{T_{\text{КГ}}} \delta(t - mT) e^{-jn\Omega_{\text{КГ}}t} dt = \frac{1}{T_{\text{КГ}}} \sum_{m=0}^3 e^{-j(n\Omega_{\text{КГ}}T + \frac{\pi}{2})m}. \quad (11)\end{aligned}$$

При вычислении интеграла было использовано фильтрующее свойство дельта-функции. Для дальнейшего упрощения выражения воспользуемся формулой суммы членов геометрической прогрессии, с помощью которой сумма в результате (11) представляется в виде рациональной функции:

$$\dot{C}_n = \frac{1}{T_{\text{КГ}}} \frac{1 - e^{-j4(n\Omega_{\text{КГ}}T + \frac{\pi}{2})}}{1 - e^{-j(n\Omega_{\text{КГ}}T + \frac{\pi}{2})}} = \frac{1}{4T} \frac{1 - e^{-j2\pi(n+1)}}{1 - e^{-j\frac{\pi}{2}(n+1)}}. \quad (12)$$

Результат выражения (12) получен с учетом равенства $T_{\text{КГ}} = 4T$, из которого следует, что $\Omega_{\text{КГ}}T = \frac{\pi}{2}$. Анализ выражения (12) показывает, что его числитель равен нулю при любом $n \in \mathbb{Z}$, а знаменатель равен нулю при $n = 4\ell - 1, \ell \in \mathbb{Z}$. Для определения значений $\dot{C}_{4\ell-1}$ воспользуемся правилом Лопиталья:

$$\dot{C}_{4\ell-1} = \frac{1}{4T} \lim_{n \rightarrow 4\ell-1} \frac{1 - e^{-j2\pi(n+1)}}{1 - e^{-j\frac{\pi}{2}(n+1)}} = \frac{1}{4T} \lim_{n \rightarrow 4\ell-1} \frac{2\pi e^{-j2\pi(n+1)}}{\frac{\pi}{2} e^{-j\frac{\pi}{2}(n+1)}} = \frac{1}{T} e^{-j6\pi\ell} = \frac{1}{T}. \quad (13)$$

Таким образом, коэффициенты ряда Фурье равны

$$\dot{C}_n = \begin{cases} \frac{1}{T}, n = 4\ell - 1, \ell \in \mathbb{Z}; \\ 0, n \neq 4\ell - 1. \end{cases} \quad (14)$$

Подставляя выражение (14) в (10), получим спектральную плотность

$$S_\delta(j\omega) = 2\pi \sum_{\ell=-\infty}^{+\infty} \dot{C}_{4\ell-1} \delta(\omega - [4\ell - 1]\Omega_{\text{КГ}}) = \frac{2\pi}{T} \sum_{\ell=-\infty}^{+\infty} \delta(\omega + \frac{\Omega}{4} - \ell\Omega), \quad (15)$$

где $\Omega = \frac{2\pi}{T} = 4\Omega_{\text{КГ}}$ – угловая частота коммутаций ключа.

По теореме о спектре свертки сигналов [14–17] спектральная плотность $S_{\text{КГ}}(j\omega)$ равна произведению:

$$S_{\text{КГ}}(j\omega) = S_{\text{И}}(j\omega) S_\delta(j\omega) = \frac{2\pi}{T} S_{\text{И}}(j\omega) \sum_{\ell=-\infty}^{+\infty} \delta(\omega + \frac{\Omega}{4} - \ell\Omega), \quad (16)$$

где $S_{\text{И}}(j\omega) = F\{u_{\text{И}}(t)\}$ – спектральная плотность одиночного видеоимпульса.

Подстановка результата (16) в выражение (8) позволяет найти спектральную плотность сигнала на выходе смесителя:

$$\begin{aligned}S_{\text{С}}(j\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2\pi}{T} S_{\text{И}}(jx) \sum_{\ell=-\infty}^{+\infty} \delta(x + \frac{\Omega}{4} - \ell\Omega) S_{\text{РЧ}}(j[\omega - x]) dx = \\ &= \frac{1}{T} \sum_{\ell=-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\text{И}}(jx) \delta(x + \frac{\Omega}{4} - \ell\Omega) S_{\text{РЧ}}(j[\omega - x]) dx = \\ &= \frac{1}{T} \sum_{\ell=-\infty}^{+\infty} S_{\text{И}}(j[\ell\Omega - \frac{\Omega}{4}]) S_{\text{РЧ}}(j[\omega + \frac{\Omega}{4} - \ell\Omega]). \quad (17)\end{aligned}$$

При интегрировании использовано фильтрующее свойство дельта-функции.

Анализ выражения (17) позволяет сделать вывод, что спектр сигнала $\dot{u}_{\text{С}}(t)$ образован из спектра радиосигнала $S_{\text{РЧ}}(j\omega)$, сдвинутого влево на $\frac{1}{4}$ частоты коммутаций ключа Ω и бесконечного числа его копий, сдвинутых на $\ell\Omega$ и взвешенных спектральной плотностью одиночного импульса $S_{\text{И}}(j\omega)$.

Частота переключений Ω выбирается равной $4\omega_0$, при этом правая половина спектра радиосигнала смещается на нулевую частоту, а ближайшие спектральные составляющие расположены на частотах $-2\omega_0$ (левая половина спектра радиосигнала, смещенная на $-\frac{\Omega}{4}$) и $2\omega_0$ (левая половина спектра радиосигнала, смещенная на $\Omega - \frac{\Omega}{4}$).

Для получения спектра сигнала на выходе преобразователя частоты предположим, что выполняется условие

$$\frac{\Delta\omega}{2} \ll \omega_{-3\text{дБ}} \ll 2\omega_0, \quad (18)$$

где $\Delta\omega$ – полоса радиосигнала;

$\omega_{-3\text{дБ}}$ – полоса пропускания ФНЧ по уровню -3 дБ.

При выполнении условия (18) можно считать, что спектральные составляющие в окрестности нулевой частоты пропускаются фильтром без искажений, а остальные спектральные составляющие подавляются настолько, что ими можно пренебречь. В этом случае для получения спектра сигнала на выходе преобразователя частоты достаточно выбрать из выражения (17) составляющие, которые находятся в окрестности нулевой несущей (в пределах $\pm \frac{\Delta\omega}{2}$):

$$S_{\text{КО}}(j\omega) \approx \frac{1}{T} S_{\text{И}}(j\frac{\Omega}{4}) S_{\text{РЧ}}(j[\omega + \frac{\Omega}{4}]), -\frac{\Delta\omega}{2} \leq \omega \leq \frac{\Delta\omega}{2}. \quad (19)$$

Коэффициент передачи преобразователя частоты. Спектральная плотность комплексной огибающей радиосигнала [16] определяется выражением:

$$S_{\text{А}}(j\omega) = 2S_{\text{РЧ}}(j[\omega + \omega_0]), -\frac{\Delta\omega}{2} \leq \omega \leq \frac{\Delta\omega}{2}. \quad (20)$$

При выборе $\frac{\Omega}{4} = \omega_0$ оказывается, что модуль отношения правых частей выражений (19) и (20) не зависит от частоты ω и имеет смысл коэффициента передачи преобразователя частоты:

$$k_{\text{ПЧ}} \approx \frac{1}{2T} |S_{\text{И}}(j\frac{\Omega}{4})|. \quad (21)$$

Для прямоугольного видеоимпульса $u_{\text{И}}(t) = 1, 0 \leq t < T$ спектральная плотность определяется выражением [17]:

$$S_{\text{И}}(j\omega) = T \frac{\sin\frac{\omega T}{2}}{\frac{\omega T}{2}} e^{-j\frac{\omega T}{2}}. \quad (22)$$

Подставляя правую часть выражения (22) в выражение (21), с учетом равенства $\Omega T = 2\pi$ получим значение коэффициента передачи

$$k_{\text{ПЧ}}^{(\text{П})} \approx \frac{2}{\pi} \sin\frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \approx 0,45016 = -6,93\text{дБ}, \quad (23)$$

где верхний индекс «(П)» означает прямоугольную форму импульса $u_{\text{И}}(t)$.

Полученный результат ровно вдвое (на 6 дБ) ниже, чем результат, полученный в работах [9] и [11], где производится грубая оценка во временной области для наиболее благоприятного случая.

Разница в 2 раза может быть объяснена тем, что в модели на рисунке (2) не учитывается влияние заряда емкостей на угол отсечки протекающего тока, а также соотношение постоянных времени заряда и разряда емкостей. С учетом этого влияния, оценку (23) можно считать нижней границей возможных значений коэффициента передачи при условии, что комплексное колебание $\dot{u}_{\text{КТ}}(t)$ состоит из идеальных прямоугольных импульсов.

Влияние формы импульсов комплексного колебания генератора на коэффициент передачи преобразователя частоты. В реальных устройствах коммутация ключа происходит за конечное время, которое на высоких частотах сопоставимо с величиной T . В предложенной модели возможен учет влияния этого фактора путем задания искаженной формы импульсов $\dot{u}_{\text{КТ}}(t)$.

При анализе цифровых устройств форма импульсов часто считается трапецеидальной [18, 19]. Используем модель $u_{\text{И}}^{(\text{T})}(t)$ (верхний индекс «(Т)» означает трапецеидальную форму импульсов):

$$u_{II}^{(T)}(t) = \begin{cases} \frac{t}{\alpha T}, & 0 \leq t < \alpha T; \\ 1, & \alpha T \leq t < T; \\ 1 - \frac{t-T}{\alpha T}, & T \leq t < T + \alpha T, \end{cases} \quad (24)$$

где $\alpha = \frac{\tau_{фр}}{T}$ – параметр, равный отношению длительности фронта $\tau_{фр}$ к длительности импульса, $0 \leq \alpha \leq 1$.

Форму импульсов $u_{II}^{(T)}(t)$ при различных значениях параметра α поясняет рис. 4.

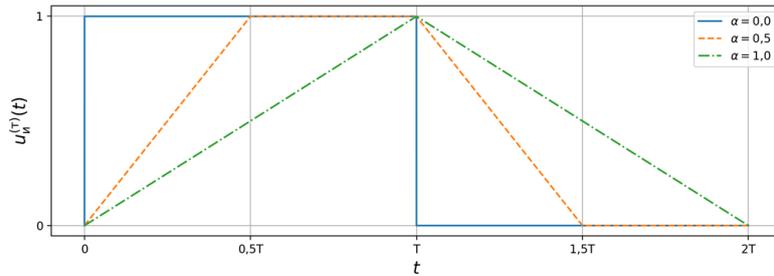


Рис. 4. Импульсы $u_{II}^{(T)}(t)$ при различных значениях параметра α

При $\alpha = 0$ длительность фронтов равна нулю, и форма импульсов идеально прямоугольная. При $\alpha = 1$ длительность фронтов равна длительности импульса – импульсы имеют форму равнобедренных треугольников.

Спектральная плотность импульса (24) может быть получена в виде:

$$S_{II}^{(T)}(j\omega) = T \frac{\sin \frac{\omega T}{2}}{\frac{\omega T}{2}} \frac{\sin \frac{\alpha \omega T}{2}}{\frac{\alpha \omega T}{2}} e^{-j \frac{(1+\alpha)\omega T}{2}}, \quad (25)$$

при этом выражение (21) для коэффициента передачи преобразователя частоты принимает вид:

$$k_{ПЧ}^{(T)}(\alpha) \approx \frac{4\sqrt{2}}{\alpha\pi^2} \sin \frac{\alpha\pi}{4}. \quad (26)$$

График отношения $k_{ПЧ}^{(T)}(\alpha)$ к $k_{ПЧ}^{(II)}$ приведен на рис. 5.

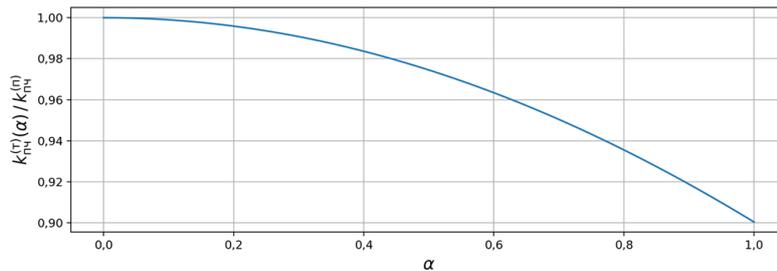


Рис. 5. Отношение коэффициента передачи преобразователя частоты $k_{ПЧ}^{(T)}(\alpha)$ (трапециевидные импульсы) к $k_{ПЧ}^{(II)}$ (прямоугольные импульсы)

При $\alpha = 0$ ухудшение отсутствует (так как импульсы прямоугольные), при максимальном значении $\alpha = 1$ наблюдается уменьшение коэффициента передачи (26) на 10%, по сравнению с (23).

Таким образом, трапециевидные и треугольные импульсы $\dot{u}_{КТ}(t)$ уменьшают коэффициент передачи преобразователя частоты незначительно.

Если искажение формы импульсов $u_{II}(t)$ обусловлено главным образом одной паразитной емкостью, может быть полезной модель импульса $u_{II}^{(\ominus)}(t)$ в виде отклика ФНЧ 1-го порядка на прямоугольный импульс (верхний индекс « \ominus » означает экспоненциальное сглаживание фронтов). Обозначим эту модель как импульс с экспоненциально сглаженными фронтами.

$$u_{II}^{(\ominus)}(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\frac{t}{\beta T}}, & 0 \leq t < T; \\ (1 - e^{-\frac{1}{\beta}})e^{-\frac{t-T}{\beta T}}, & t \geq T, \end{cases} \quad (27)$$

где $\beta = \frac{\tau_{\ominus}}{T}$ – параметр, равный отношению постоянной времени сглаживания τ_{\ominus} к длительности импульса, $\beta > 0$.

Форму импульсов $u_{II}^{(\ominus)}(t)$ при различных значениях параметра β поясняет рис. 6.

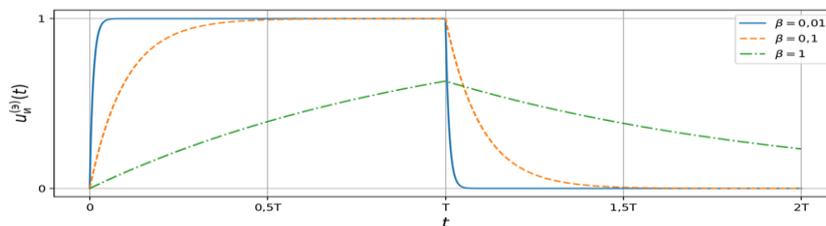


Рис. 6. Импульсы $u_{II}^{(\ominus)}(t)$ при различных значениях параметра β

Спектральную плотность импульса (27) запишем в виде:

$$S_{II}^{(\ominus)}(j\omega) = \frac{T}{1+j\omega\beta T} \frac{\sin\frac{\omega T}{2}}{\frac{\omega T}{2}} e^{-j\frac{\omega T}{2}}, \quad (28)$$

тогда выражение (21) для коэффициента передачи преобразователя частоты примет вид:

$$k_{ПЧ}^{(\ominus)}(\beta) \approx \frac{\sqrt{2}}{\pi \sqrt{1+(\frac{\beta\pi}{2})^2}}. \quad (29)$$

График отношения $k_{ПЧ}^{(\ominus)}(\beta)$ к $k_{ПЧ}^{(II)}$ приведен на рис. 7.

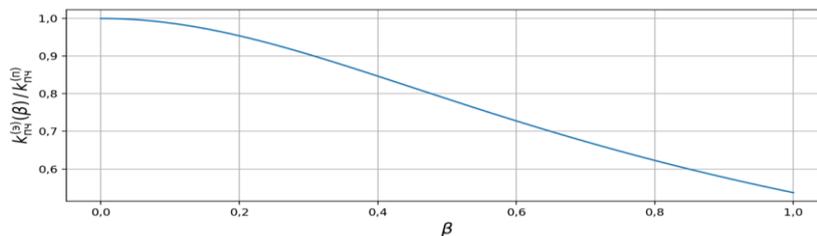


Рис. 7. Отношение коэффициента передачи преобразователя частоты $k_{ПЧ}^{(\ominus)}(\beta)$ (импульсы с экспоненциально сглаженными фронтами) к $k_{ПЧ}^{(II)}$ (прямоугольные импульсы)

Значительное ухудшение $k_{ПЧ}^{(\ominus)}(\beta)$ с ростом β объясняется тем, что высота импульсов уменьшается с ростом постоянной времени сглаживания.

Заключение. В работе предложена простая математическая модель квадратурного стробоскопического преобразователя частоты. При ограничениях, соответствующих нормальному режиму работы преобразователя частоты, получено выражение для его коэффициента передачи.

Полученное значение коэффициента передачи преобразователя (23) меньше значения, которое приводится в других источниках, ровно в 2 раза и может рассматриваться как нижняя граница значений, которые могут наблюдаться на практике.

Показано, что выражение (21) может быть использовано для исследования влияния конечного времени переключения ключа на коэффициент передачи преобразователя частоты. Проведено исследование двух моделей искажений формы стробирующих импульсов (трапецеидальные импульсы и импульсы с экспоненциально сглаженными фронтами). Получены зависимости ухудшения коэффициента передачи преобразователя частоты от параметров этих моделей.

Приведенные результаты могут быть полезны для анализа работы квадратурного стробоскопического преобразователя частоты (детектора Тейло) с точки зрения теории сигналов.

Предложенная математическая модель квадратурного стробоскопического преобразователя частоты может быть дополнительно усложнена для исследования влияния других факторов на характеристики преобразователя [20]. Среди факторов, влияние которых может быть учтено, следует отметить кратковременную нестабильность (джиттер) периода стробирующих импульсов и неидентичность характеристик квадратурных каналов.

Таким образом, возможно использование полученных результатов для проектирования радиоприемных устройств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Travis F. Collins, Robin Getz, Di Pu, Alexander M. Wyglinski.* Software-Defined Radio for Engineers. – Artech House, 2018. – ISBN: 978-1-63081-457-1.
2. *Gerald Youngblood.* A Software-Defined Radio for the Masses. Part 1. – Свободный режим доступа: <https://www.arl.org/files/file/Technology/tis/info/pdf/020708qex013.pdf> (дата обращения: 25.03.2024).
3. *Цветков Ф.А., Терешков В.В.* Программно-конфигурируемые радиоустройства: принципы построения и алгоритмы обработки сигналов: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – 163 с.
4. *Поляков В.Т.* Радиолюбителям о технике прямого преобразования. – М.: Патриот, 1990. – 264 с.
5. *Hans Summers.* Modern QRP Rigs and the Development of the QCX CW Transceiver Kit. – Свободный режим доступа: <https://www.qrp-labs.com/images/news/dayton2018/fdim2018.pdf> (дата обращения: 25.03.2024).
6. *Руднев Д.* Проект «Селенит». – Свободный режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/tuvds/articles/771652/> (дата обращения: 25.03.2024).
7. *AYN/DC: CW QRP трансивер прямого преобразования.* – Свободный режим доступа: <https://eah.me/ayn-dc-transceiver/> (дата обращения: 25.03.2024).
8. Квадратурный сэмплирующий детектор по схеме Тейло. – Свободный режим доступа: <https://eah.me/tayloe-detector/> (дата обращения: 25.03.2024).
9. *Dan Tayloe.* Ultra Low Noise, High Performance, Zero IF Quadrature Product Detector and Preamplifier. – Свободный режим доступа: https://www.norcalqrp.org/files/Tayloe_mixer_x3a.pdf (дата обращения: 25.03.2024).
10. *Zenaneh Ashebir Kebede.* Low frequency Quadrature detector design, simulation and implementation for use in underground communication implementation for use in underground communication. – Свободный режим доступа: <https://researchrepository.wvu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1222&context=etd> (дата обращения: 25.03.2024).
11. *Michiel Soer.* Analysis and comparison of switch-based frequency converters. – Свободный режим доступа: https://essay.utwente.nl/58276/1/scriptie_Soer.pdf (дата обращения: 25.03.2024).
12. *Федосов Д.В.* Анализ стробоскопического преобразователя частоты // Вестник Омского университета. – 1996. – Вып. 2. – С. 36-38.
13. *Дингес С., Кочемасов В.* СВЧ-преобразователи частоты. Ч. 2. Классификация преобразователей по принципу функционирования // Компоненты и технологии. – 2018. – № 5 (202). – С. 12-21.
14. *Федосов В.П.* Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – 282 с.
15. *Марьев А.А.* Методы и устройства цифровой обработки сигналов: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – 134 с.
16. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки "Радиотехника". – 5-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2006. – 719 с.

17. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов по специальности "Радиотехника". – 5-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2005 (ГУП Смол. обл. тип. им. В.И. Смирнова). – 462 с.
18. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника: учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 816 с.
19. Дэвид М. Харрис, Сара Л. Харрис. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера: пер. с англ. Imagination Technologies. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 792 с.
20. Schenk Tim. RF imperfections in high-rate wireless systems: Impact and digital compensation. – 2008. – 10.1007/978-1-4020-6903-1.

REFERENCES

1. Travis F. Collins, Robin Getz, Di Pu, Alexander M. Wyglinski. Software-Defined Radio for Engineers. Artech House, 2018. ISBN: 978-1-63081-457-1.
2. Gerald Youngblood. A Software-Defined Radio for the Masses. Part 1. Available at: <https://www.arll.org/files/file/Technology/tis/info/pdf/020708qex013.pdf> (accessed 25 March 2024).
3. Tsvetkov F.A., Tereshkov V.V. Programmno-konfiguriruyemye radioustroystva: printsipy postroeniya i algoritmy obrabotki signalov: ucheb. posobie [Software-defined radio devices: design principles and signal processing algorithms: tutorial]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2020, 163 p.
4. Polyakov V.T. Radiolyubitelyam o tekhnike pryamogo preobrazovaniya [Radio amateurs about direct conversion technology]. Moscow: Patriot, 1990, 264 p.
5. Hans Summers. Modern QRP Rigs and the Development of the QCX CW Transceiver Kit. Available at: <https://www.qrp-labs.com/images/news/dayton2018/fdim2018.pdf> (accessed 25 March 2024).
6. Rudnev D. Proekt «Selenit» [Project "Selenite"]. Available at: <https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/771652/> (accessed 25 March 2024).
7. AYN/DC: CW QRP transiver pryamogo preobrazovaniya [AYN/DC: CW QRP direct conversion transceiver]. Available at: <https://eax.me/ayn-dc-transceiver/> (accessed 25 March 2024).
8. Kvadraturnyy sempliruyushchiy detektor po skheme Teylo [Quadrature sampling detector based on the Taylo scheme]. Available at: <https://eax.me/tayloe-detector/> (accessed 25 March 2024).
9. Dan Tayloe. Ultra Low Noise, High Performance, Zero IF Quadrature Product Detector and Preamplifier. Available at: https://www.norcalqrp.org/files/Tayloe_mixer_x3a.pdf (accessed 25 March 2024).
10. Zenaneh Ashebir Kebede. Low frequency Quadrature detector design, simulation and implementation for use in underground communication implementation for use in underground communication. Available at: <https://researchrepository.wvu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1222&context=etd> (accessed 25 March 2024).
11. Michiel Soer. Analysis and comparison of switch-based frequency converters. – Available at: https://essay.utwente.nl/58276/1/scriptie_Soer.pdf (accessed 25 March 2024).
12. Fedosov D.V. Analiz stroboskopicheskogo preobrazovatelya chastoty [Analysis of a stroboscopic frequency converter], *Vestnik Omskogo universiteta* [Bulletin of Omsk University], 1996, Issue 2, pp. 36-38.
13. Dinges S., Kochemasov V. SVCh-preobrazovatelya chastoty. Ch. 2. Klassifikatsiya preobrazovatelye po printsipu funktsionirovaniya [Microwave frequency converters. Part 2. Classification of converters according to the principle of operation], *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2018, No. 5 (202), pp. 12-21.
14. Fedosov V.P. Radiotekhnicheskie tsepi i signaly: ucheb. posobie [Radio engineering circuits and signals: textbook]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2017, 282 p.
15. Mar'ev A.A. Metody i ustroystva tsifrovoy obrabotki signalov: ucheb. posobie [Methods and devices of digital signal processing: textbook]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2020, 134 p.
16. Gonorovskiy I.S. Radiotekhnicheskie tsepi i signaly: ucheb. posobie dlya studentov vuzov, obuchayushchikhsya po napravleniyu podgotovki "Radiotekhnika" [Radio engineering circuits and signals: a textbook for university students studying in the field of training "Radio engineering"]. 5th ed. Moscow: Drofa, 2006, 719 p.
17. Baskakov S.I. Radiotekhnicheskie tsepi i signaly: ucheb. dlya vuzov po spetsial'nosti "Radiotekhnika" [Radio engineering circuits and signals: a textbook for universities specializing in "Radio engineering"]. 5th ed. Moscow: Vysshaya shkola, 2005 (GUP Smol. obl. tip. im. V.I. Smirnova), 462 p.
18. Ugryumov E.P. Tsifrovaya skhemotekhnika: ucheb. posobie dlya vuzov [Digital circuitry: a textbook for universities]. 3rd ed. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2010, 816 p.

19. Devid M. Kharris, Sara L. Kharris. Tsifrovaya skhemotekhnika i arkhitektura komp'yutera: per. s angl. Imagination Technologies [Digital circuitry and computer architecture: trans. from English Imagination Technologies]. Moscow: DMK Press, 2018, 792 p.
20. Schenk Tim. RF imperfections in high-rate wireless systems: Impact and digital compensation, 2008. 10.1007/978-1-4020-6903-1.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.И. Турулин.

Марьев Александр Александрович – Южный федеральный университет; e-mail: aamarev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; доцент.

Maryev Alexander Alexandrovich – Southern Federal University; e-mail: aamarev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371632; the Department of Fundamentals of Radio Engineering; associate professor.

УДК 621.315.611

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-207-219

Н.К. Полуянович, О.В. Качелаев, М.Н. Дубяго, С.Б. Мальков

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ С АТИПИЧНЫМ ХАРАКТЕРОМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Рассматривается создание интеллектуального устройства прогнозирования энергопотребления для потребителей с атипичным характером электропотребления, в зависимости от требуемой точности прогноза, учитывающее кроме целевых параметров электросети (P , Q) технологические процессы предприятий, воздействующие факторы: социально-экономические (час суток; день недели; порядковый номер дня в году; признак праздника или массовых событий d); метеорологические: (ветро-холодовой индекс). Модель относится к интеллектуальным устройствам для адаптивного прогнозирования режимов энергопотребления электросети на основе многослойной нейронной сети. Статья посвящена выбору оптимальной архитектуры нейросети (НС) и метода ее обучения, обеспечивающих прогнозирование с наименьшей погрешностью. Синтезирована и протестирована многофакторная модель электропотребления на основе многослойной НС. В рамках проведенного исследования построена НС модель, описывающая архитектуру киберфизической системы (КФС) прогнозирования электропотребления. Установлено, что для каждого потребителя по причине значительных различий в характере энергопотребления необходимо экспериментальным путем и подбирать параметры сети, с целью достижения минимальной погрешности прогнозирования. Показано, что при атипичном электропотреблении т.е. не повторяющемся за периоды времени (час, день, неделя и т.д.) методы искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения являются эффективным инструментом решения слабо формализуемых или не формализуемых задач. Разработанная модель имеет приемлемую точность (отклонение MSE до 15%). Для повышения точности прогноза необходимо проводить регулярное уточнение модели и её настройку на фактическую ситуацию, учитывать новые аддитивные факторы, оказывающие влияние на кривую электропотребления. Возможность использования данного устройства в системах технологического управления региональными сетевыми компаниями, составляющего основу иерархической автоматизированной информационно измерительной системы контроля и учета электроэнергии, за счет учета и прогнозирования активной и реактивной мощности электропотребителей.

Кибер-физическая система; нейронная сеть; атипичный характер электропотребления; надежность систем энергоснабжения.

N.K. Poluyanovich, O.V. Kachelaev, M.N. Dubyago, S.B. Malkov

OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE OF THE ENERGY CONSUMPTION FORECASTING SYSTEM WITH ATYPICAL ENERGY CONSUMPTION PATTERNS

The creation of an intelligent energy consumption forecasting device for consumers with atypical energy consumption is considered, depending on the required forecast accuracy, taking into account, in addition to the target parameters of the power grid (P , Q), technological processes of enterprises, influencing factors: socio-economic (hour of the day; day of the week; ordinal number of the day in the year; sign of a holiday or mass events d); meteorological: (wind-cold index). The model refers to intelligent

devices for adaptive forecasting of power consumption modes of the electric grid based on a multilayer neural network. The article is devoted to the choice of the optimal architecture of the neural network (NN) and the method of its training, providing forecasting with the least error. A multifunctional model of power consumption based on a multilayer NN has been synthesized and tested. Within the framework of the conducted research, an NN model was built describing the architecture of a cyber-physical system (CFS) for forecasting power consumption. It has been established that for each consumer, due to significant differences in the nature of energy consumption, it is necessary to experimentally select network parameters in order to achieve a minimum prediction error. It is shown that with atypical power consumption, i.e., not repeated over time periods (hour, day, week, etc.), artificial intelligence and deep machine learning methods are an effective tool for solving poorly formalized or non-formalized tasks. The developed model has acceptable accuracy (MSE deviation up to 15%). To increase the accuracy of the forecast, it is necessary to carry out a regular refinement of the model and adjust it to the actual situation, taking into account new additive factors affecting the electricity consumption curve. The possibility of using this device in the technological management systems of regional grid companies, which forms the basis of a hierarchical automated information measuring system for monitoring and accounting for electricity, by accounting and forecasting the active and reactive power of electric consumers

Cyber-physical system; neural network; atypical nature of power consumption; reliability of power supply systems.

Введение. Актуальность стратегических приоритетов и цели государственной политики в сфере реализации комплексной государственной программы Российской Федерации для современных предприятий были обозначены в постановлении Правительства РФ от 9 сентября 2023 г. N 1473 "Об утверждении комплексной государственной программы Российской Федерации "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности" [1–3].

Текущая ситуация в сфере электроснабжения характеризуется значительным физическим износом оборудования, высокими показателями удельных расходов топлива и потерь в сетях. Проводится модернизация предприятий, генерирующих электрическую энергию, устанавливаются приборы учета.

Согласно Указа Правительства РФ ставится задача глобального уровня, направленная на снижения энергоемкости на 40% относительно показателей за две тысячи седьмой год. Мероприятия, нацеленные на увеличение энергоэффективности, увеличение прибыли, за счет снижения убытков предприятий, выполняющих задачи в отрасли электроэнергетики, начинают производиться в настоящее время. Важнейшей задачей становится прогнозирования потребленных объемов электроэнергии, в разрезе мероприятий, направленных на оптимизацию электроэнергетических затрат предприятия [4]. Остро встает вопрос как прогнозирования, так и планирования потребления электроэнергии по причине вводимых на электроэнергетическом рынке реформ.

Проблема прогнозирования электропотребления заключается в том, что необходимо учесть огромное количество факторов, имеющих влияние на изменение энергопотребления [5–8]. По оценкам российских специалистов, каждая оплошность в ежегодном прогнозе электропотребления на 1% – это 4 млрд. долларов дополнительных инвестиций на возведение генерирующих мощностей [9].

Целью прогнозирования электропотребления является обеспечение баланса между выработанной и потребленной электроэнергией [10, 11].

Постановка задачи. Разработка оптимальной структуры системы прогнозирования для потребителей с атипичным характером электропотребления т.е. не повторяющимся значением (P, Q) за рассматриваемые периоды времени, а также математической модели прогнозируемого объема электропотребления, включающей в себя кроме целевых параметров электросети (P, Q) учет воздействующих факторов: социально-экономических; технологических и метеорологических.

Обзор литературных источников. Применение в прогнозировании методов на основе регрессионного анализа описано в работе Манусова В.З. и Никифорова Г.В., применительно к краткосрочному прогнозированию объемов потребления электроэнергии. Прогнозирование на основе ИНС было предложено Поляковым Д.А., Вороновым И.В. и Демура А.В. В свою очередь, Клеопатровым Д.И. было предложено применение метода экспоненциального сглаживания в задачах прогнозирования. Лагуткин О.Е. предложил

метод на основе техноценоза. Влияние точности прогнозов потребления на технологические и экономические показатели энергосистемы рассмотрено в работе [12]. Для обеспечения минимального расхода электроэнергии, предотвращения перегрузок на электрооборудовании и в электросетях, а также улучшения качества электроэнергии энергосистемам необходимо повышать точность прогноза [13–15].

Однако, в случае с потребителями с атипичным характером потребления электроэнергии, предложенные методы не могут быть полноценно применены. Причиной являются такие ограничения как: большой период времени, за который собираются статистические выборки и отсутствие возможности применения большого количества влияющих факторов.

Задачам создания интеллектуальных устройств прогнозирования энергопотребления посвящено много работ. Так в [16] указывается возможность использования нейронной сети прямой связи для прогнозирования электропотребления. Однако данный метод не позволяет: учитывать реактивную мощность, учитывать данные о метеорологических параметрах; нет механизма адаптации.

С целью прогнозирования кратко- и среднесрочных объемов потребления электроэнергии может применяться «Устройство прогнозирования электропотребления на основе многослойной нейронной сети» [17]. Данное устройство может обеспечить формирование значений на основе разности фактических и аппроксимированных значений потреблённой электроэнергии. Данный факт положительно сказывается на точности прогнозирования, путем сужения интервала необходимой нормализации данных. Однако недостатком данного устройства являются отсутствие механизма адаптации.

«Устройство мониторинга и прогнозирования электропотребления в электроэнергетических системах на основе нейронных структур» [18], не учитывает данные о внешних воздействующих факторах, таких как: скорость ветра; наличие осадков; отсутствие блока адаптации под конкретного потребителя (учет характера кривой потребления электроэнергии) и подстройки устройства в зависимости от получаемой точности прогнозирования. Таким образом встает задача разработки интеллектуального устройства адаптивного прогнозирования режимов энергопотребления электросети.

Разработка устройства. Предлагаемое интеллектуальное адаптивного прогнозирования режимов энергопотребления электросети содержит (рис. 1) – датчик тока/датчик напряжения блок 1 (ДТ/ДН), – блок интеллектуального счетчика электроэнергии (2), – блок регистрации метеофакторов (3), – блок нейрокомпьютера (4). Текущие данные сети ($P_{сети}$, $Q_{сети}$), снимаемые с блока ДТ/ДН (1) (дата, время, $P_{сч}$, $Q_{сч}$) подаются на вход блока интеллектуального счетчика ЭЭ (2), а также метеофакторы (температура, скорость ветра, осадки), снимаемые с блока регистрации метеофакторов (3) поступают на блок адаптации НС, выполняющий функции обработки входных данных и выбора нейросети. Данный блок соединен с блоком 5, давая команду на переобучение НС при необходимости. Спрогнозированные значения, снимаемые с выхода нейросетевой модели, подаются на блок УПС. Данный блок выполняет обратное преобразование нормированных значений в исходную размерность.

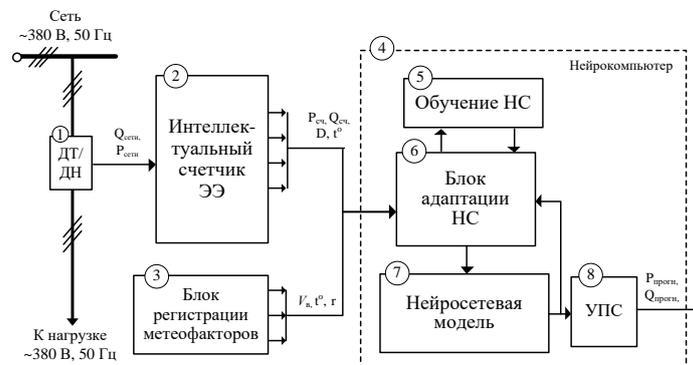


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальное устройство адаптивного прогнозирования

Для решения задачи адаптивного прогнозирования режимов энергопотребления электросети [1, 2] предлагается в интеллектуальное устройство ввести блок адаптации НС (6) (рис. 2)

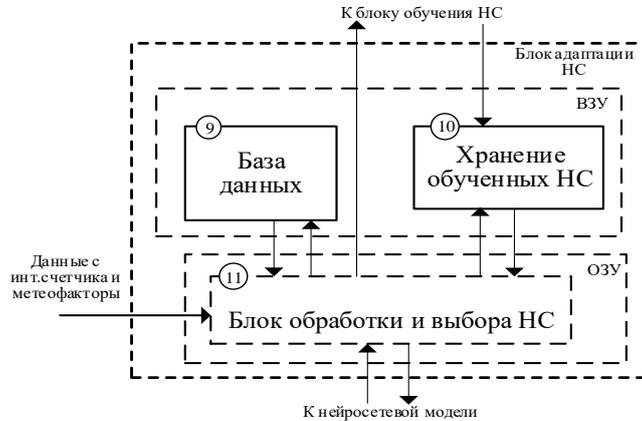


Рис. 2. Структура блока адаптации нейросети

Блок адаптации НС содержит блок обработки и выбора НС, блок базы данных и блок хранения обученных НС. Входные данные, снимаемые с приборов учета и регистрации, подаются на блок обработки и выбора НС. Блок обработки и выбора НС осуществляет функции обработки входных данных, снимаемых с приборов учета и выполнение оценки качества прогнозирования. А также осуществляет формирование обучающей выборки, добавляя к ней новые значения, снимаемые с интеллектуального счетчика и блока регистрации метеофакторов и дополнение базы данных. В случае превышения допустимого отклонения прогноза, данным блоком принимается решение о смене рабочей сети на другую, из набора предобученных сетей. Если перебор не дает положительного результата, принимается решение о необходимости переобучения НС, на основе дополненной обучающей выборки.

Блок нейросетевой модели (7) представляет собой две нейросети НС1 и НС2, рис. 3. На вход НС1 и НС2 поступают данные, снимаемые с выхода блока (11). Спрогнозированные значения (P'), снимаемые с выхода НС1 являются основой для прогнозирования Q' и подаются на вход НС2. С выходов НС1 и НС2 снимаются данные, которые являются прогнозным значением количества потребленной электроэнергии, в состав блока НС1 и НС2 входит выходной слой, полностью связанный с нейронами скрытого слоя и один скрытый слой, полностью связанный с выходным слоем.

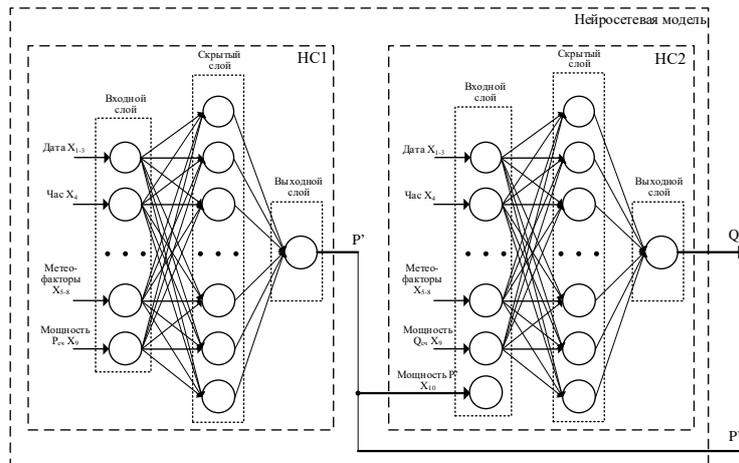


Рис. 3. Структура блока нейросетевой модели

Таким образом, техническим результатом модели является непрерывная диагностика, мониторинг и прогнозирование энергопотребления, с учетом следующих факторов: времени, метеорологических условий, режима работы потребителей электроэнергии (активная и реактивная мощность) в реальном режиме времени, автоматизированный подбор наиболее подходящей нейронной сети в случае превышения погрешности прогнозирования.

Преимуществом разрабатываемого устройства, перед известными, является:

- ◆ Возможность адаптации устройства к конкретному потребителю и подстройки в зависимости от требуемой точности прогноза;

- ◆ Математическая модель прогнозируемого объема электропотребления, включающая в себя кроме целевых параметров электросети (P, Q) учитывающих технологические процессы предприятий, воздействующие факторы: социально-экономические (час суток; день недели; порядковый номер дня в году; признак праздника или массовых событий d); метеорологические: (ветро-холодовой индекс).

Алгоритм обучения НС с распараллеливанием вычислений. Усовершенствованный алгоритм обучения по методу обратного распространения ошибки [21] представлен на рис.4. После пуска и установки начальных условий в блоках 1-5 (начальных значений весовых коэффициентов, количества обучающих образцов NP, параметров ИНС η и α , заданной малой величины s, определяющей точность прогноза) считываются значения нагрузки P_1, \dots, P_{24} и нормализуются (т.е. преобразуются в относительные величины Y_i , находящиеся в пределах $0 \leq Y_i \leq 1$, где $1 \leq i \leq 24$). Производится сглаживание входных данных по принципу расчета среднего числа $P_{сгл} = \frac{P_n + P_{n+1}}{2}$. В блоке 3 происходит загрузка данных в память GPU. Параллельные вычисления обеспечивает технология CUDA. В блоке 6 рассчитываются значения сигналов на входах и выходах нейронов скрытого слоя j и выходного слоя k по следующим формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} net_k = \sum_{j=1}^{24} w_{ji} \cdot Y_i, \quad j = 1, 2, \dots, 5; \\ Y_i = \frac{1}{1 + e^{-(net_j + \theta_j)}}; \\ net_k = \sum_{j=1}^5 w_{kj} \cdot Y_j, \quad k = 1; \\ Y_k = \frac{1}{1 + e^{-(net_k + \theta_k)}}. \end{array} \right. \quad \#(1)$$

Здесь w_{ji} и w_{kj} – весовые коэффициенты соответственно между нейронами j-го и i-го слоя и k-го и j-го слоя, θ – смещение. Для ограничения пространства поиска при обучении минимизируется целевая функция ошибки, которая находится по методу наименьших квадратов [6]:

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{KN} (d_k - Y_k)^2, \quad \#(2)$$

где d_k – желаемое значение нагрузки на выходе, Y_k – расчетное значение, KN – число нейронов в выходном слое. Поскольку в выходном слое один нейрон, то ошибка:

$$E_p = \frac{1}{2} (d_k - Y_k)^2 \text{ для каждого обучаемого образца } p.$$

Далее рассчитываются градиентные спуски в пространстве весов w_{ji} и w_{kj} и на их основании производится корректировка весов по следующим формулам [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta w_{kj}(p) = \eta \delta_k Y_j + \alpha \Delta w_{kj}(p-1); \\ \Delta w_{ji}(p) = \eta \delta_k Y_i + \alpha \Delta w_{ji}(p-1); \\ \delta_k = (d_k - Y_k) Y_k (1 - Y_k); \\ \delta_j = Y_j (1 - Y_j) \sum_k \delta_k w_{kj}; \\ w_{ji}^{\text{нов}} = w_{ji}^{\text{стар}} + \Delta w_{ji}(p); \\ w_{kj}^{\text{нов}} = w_{kj}^{\text{стар}} + \Delta w_{kj}(p). \end{array} \right. \quad \#(3)$$

В этих соотношениях: p – номер образца; η – коэффициент скорости обучения, значение которого, как правило, выбирают в интервале $[0, 1]$; α – момент, определяющий ускорение обучения, который также выбирается в интервале $[0, 1]$. В данном алгоритме $\eta = 0,3$; $\alpha = 0,7$; $\varepsilon = 10^{-6}$ (выбраны по критерию минимизации погрешности прогноза). Блок 7 (рис. 4) определяет, все ли образцы использованы. Если все, то вычисляется суммарная ошибка по всем образцам в блоке 9 и проверяется условие в блоке 10. В случае удовлетворения уравнения в блоке 10 происходит выгрузка данных из памяти GPU блок 13 и обучение завершается, в противном случае, в блоке 12 происходит корректировка весовых значений по величине ошибки (обратное распространение ошибки) и цикл начинается заново.

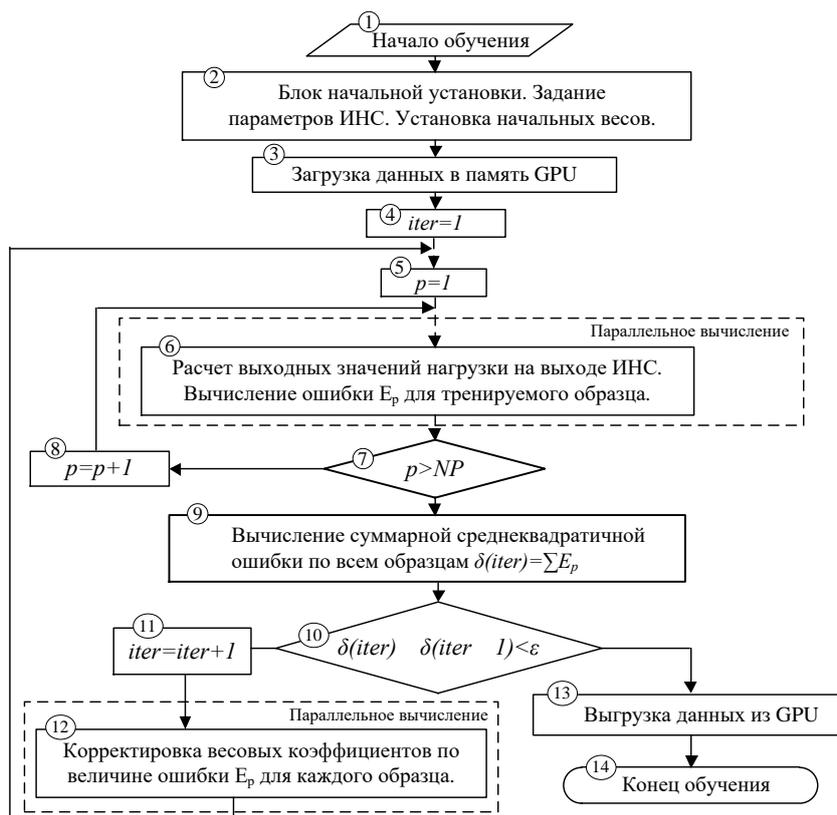


Рис. 4. Алгоритм обучения многофакторной НС распараллеливанием вычислений

Формирование обучающей выборки данных является необходимым для процесса обучения нейросети. Точность модели зависит также от размеров обучающей выборки – чем больше, тем точнее. Однако чрезмерный размер обучающей выборки приводит к затягиванию по времени процесса обучения. Какого-то определенного правила, способного определить оптимальный размер обучающей выборки на сегодняшний день не существует [8, 22]. Как правило, в известных работах используется объем образцов больший, чем количество изменяемых параметров ИНС (W_{ij} , W_{jk}) по меньшей мере в 2 раза или более. Однако в других работах настаивают на размерности выборки меньшей, нежели чем количество весов W_{ij} , W_{jk} . Как следствие – решение данной проблемы экспериментальным путем целесообразнее.

Таким образом, в ходе экспериментов замечено, что применение технологии CUDA для распараллеливания вычислений при обучении нейронной сети позволяет значительно сократить время, необходимое НС для подбора весовых значений (до 20%) и снизить нагрузку на ЦП компьютера.

Для увеличения информативности данных при обучении для нейросети, что обеспечивает также увеличение точности прогнозирования применяется нормализация на основе формулы максимума-минимума:

$$P_{\text{норм}} = \frac{P_{\text{факт}} - P_{\text{min}}}{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}, \quad \#(4)$$

где $P_{\text{факт}}$ – нормируемое значение, P_{min} – минимальное значение P в массиве данных, P_{max} – максимальное значение P в массиве данных.

Для улучшения стабильности и скорости сходимости применяется метод сглаживания вектора значений. Сглаживание входных данных реализуется по формуле:

$$P_{\text{сгл}} = \frac{P_n + P_{n+1}}{2}, \quad \#(5)$$

где $P_{\text{сгл}}$ – сглаженное значение, P_n, P_{n+1} – значение мощности, n – значение временного шага.

Оценка точности прогнозирования, позволяющая принимать решение о необходимости смены нейросети в случае несоответствия точности прогноза заданному значению, осуществляется по формуле MSE:

$$\delta_{\text{прог}} = \frac{\sum (P_{\text{факт}} - P_{\text{прог}})^2}{n}. \quad \#(6)$$

Многофакторное моделирование электропотребления. В ходе решения задач по оценке воздействия различных влияющих факторов на результаты прогнозирования, возникает необходимость решения проблемы формы модели. В данном случае, как правило, выбор останавливается на простых и легко интерпретируемых методах множественной линейной регрессии [19]. Сложным процессом, приводящим иногда к неочевидным результатам, является формирование набора факторов, способных объяснить изменения в прогнозируемом графике.

Размеры обучающих выборок для обучения FFBP–нейросети составляют 17520 значений почасового потребления электроэнергии, что соответствует временному интервалу в 2 года. При обучении и тестировании на вход FFBP сети подавались:

- ◆ целевыми данными являются прогнозные значения потребленной активной мощности (P);
- ◆ социально-экономические факторы: Время, t – час, сутки, неделя, месяц; Дата, D – день, M – месяц, Y – год; Статус дня, S (1 – рабочий, 0 – выходной);
- ◆ метеорологические: Температура среды, T (наличие осадков, R (1 – осадки есть, 0 – осадков нет); Скорость ветра, W .

Рассматриваемые потребители отличается атипичным потреблением электроэнергии т.е. не повторяющимся значением (P, Q) за рассматриваемые периоды времени (час, день, неделя и т.д.). Графики прогноза электропотребления для двух различных потребителей (ТП-466п и АР-204), на сутки с помощью каскадной НС обратного распространения (Feed-Forward backprop) приведены на рис. 5 [20].

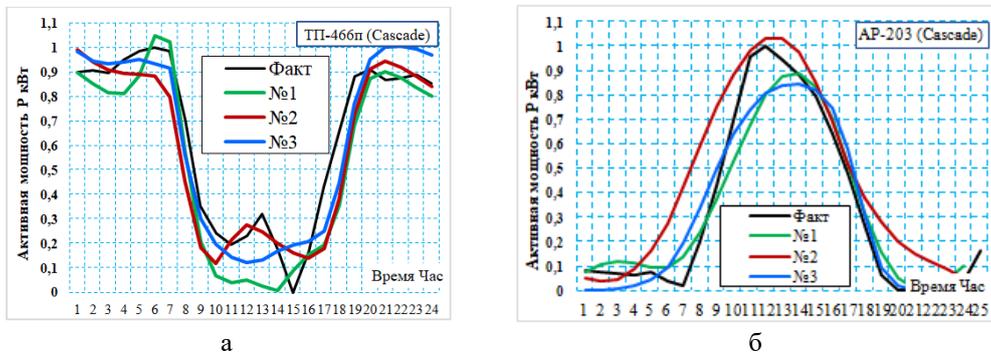


Рис. 5. Сравнение графиков прогноза и фактического значения активной мощности

Графики прогноза электропотребления для одного из потребителей (ТП-466п), на неделю с помощью каскадной НС обратного распространения (Feed-Forward backprop) приведены на рис. 6 [20].

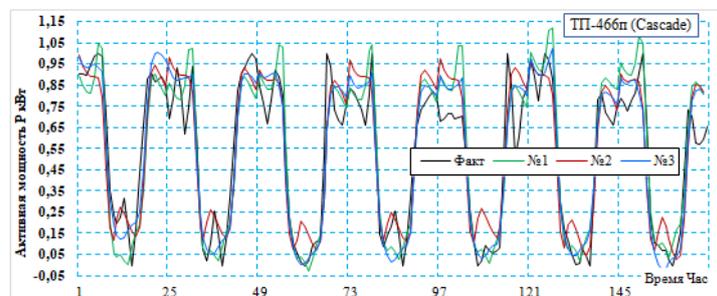


Рис. 6. Сравнение графиков прогноза и фактического значения активной мощности

Графики прогноза электропотребления для потребителя АР-203, на месяц с помощью каскадной НС обратного распространения (Feed-Forward backprop) приведены на рис. 7 [20].

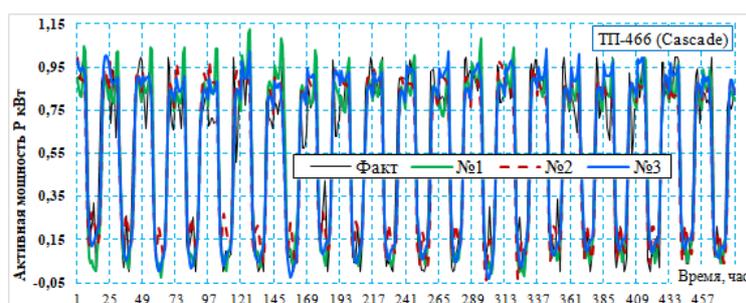


Рис. 7. Сравнение графиков прогноза и фактического значения активной мощности

Сравнение параметров НС. Для снижения погрешности прогнозирования электропотребления, необходимо провести сравнение различных структур нейронные сети (НС): Элмана обратного распространения, каскадная обратного распространения и сеть прямой связи с обратным распространением, а также их параметров (определить оптимальные настройки НС. Исследовались такие параметры нейросети как: тип НС; функция обучения; количество нейронов в скрытом слое; функция адаптации; функция активации нейронов скрытого и выходного слоя. Параметры и настройки различных типов нейронных сетей, применяемых при обучении приведены в табл. 1. Для выбора оптимальной архитектуры сети приведено сравнение работы НС различной структуры, результаты представлены в табл. 1.

Анализ полученных результатов. Проведен выбор оптимальной архитектуры и метода обучения НС, обеспечивающих прогнозирование электропотребления с наименьшей погрешностью:

- ◆ для потребителя с постоянным характером потребления достаточно модели НС с одним скрытым слоем, и количеством нейронов до 20.

Для потребителей с атипичным характером потребления:

- ◆ для потребителей типа ТП-466п оптимальной является сеть типа FFBP (Feed-forward) и с настройками №3 (сеть прямой связи с обратным распространением ошибки; обучение по принципу Байесовской регуляризации; 15 нейронов в скрытом слое; градиентный спуск с весом импульса и функцией изучения смещения, Logsig-Tansig);

♦ для потребителя типа AP-204 оптимальной является сеть типа CFBP (Cascade-forward) с настройками №3 (Каскадная сеть прямой связи с обратным распространением ошибки; обучение по принципу Левенберга-Марквардта; 47 нейронов в скрытом слое; градиентный спуск с весом импульса и функцией изучения смещения, Tansig-Tansig);

Таблица 1

Сравнения работы НС различной структуры

№ комбинации параметров	Тип сети Срок прогноза	Элмана обратного распространения (EBP)		Каскадная обратного распространения (CFBP)		Прямой связи с обратным распространением (FFBP)	
		ТП-466	AP-204	ТП-466	AP-204	ТП-466	AP-204
		1	На день	0.089	0.14	0.088	0.130
2	0.12	0.11		0.125	0.152	0.071	0.107
3	0.085	0.13		0.095	0.077	0.059	0.113
1	На неделю	0.10	0.16	0.101	0.17	0.113	0.118
2		0.13	0.17	0.108	0.199	0.083	0.115
3		0.11	0.16	0.109	0.156	0.084	0.12
1	На месяц	0.098	0.14	0.104	0.139	0.106	0.111
2		0.12	0.15	0.109	0.204	0.09	0.112
3		0.11	0.14	0.108	0.136	0.091	0.113

Для потребителей с атипичным характером электропотребления предлагается подбирать параметры из более широкого списка и в большем диапазоне, например: количество нейронов в скрытых слоях имеет смысл перебирать в диапазоне от 10 до 50 нейронов, в некоторых случаях может потребоваться добавление второго скрытого слоя. Следовательно, для каждого потребителя по причине значительных различий в характере энергопотребления необходимо индивидуально подбирать параметры сети, с целью достижения минимальной погрешности прогнозирования. экспериментальным путем.

Заключение. Преимуществом разрабатываемого устройства, перед известными, является:

1. Возможность адаптации устройства к конкретному потребителю и подстройки в зависимости от требуемой точности прогноза;
2. Математическая модель прогнозируемого объема электропотребления, включающая в себя кроме целевых параметров электросети (P, Q) учитывающих технологические процессы предприятий, воздействующие факторы: социально-экономические (час суток; день недели; порядковый номер дня в году; признак праздника или массовых событий); метеорологические (ветро-холодовой индекс);
3. Возможность использования данного устройства в системах технологического управления региональными сетевыми компаниями, составляющего основу иерархической автоматизированной информационно измерительной системы контроля и учета электроэнергии, за счет учета и прогнозирования активной и реактивной мощности электропотребителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Постановление Правительства РФ от 9 сентября 2023 г. N 1473 "Об утверждении комплексной государственной программы Российской Федерации "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности". Размещен в СПС "Консультант Плюс". – <https://base.garant.ru/407632842/>.

2. *Полуянович Н.К.* Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. Допущено УМО по образованию в области энергетики и электротехники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 140610 – «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» направления подготовки 140600 – «Электротехника, электромеханика и электро-технологии». Сер. учебники для вузов. Специальная литература. – 3-е изд. стереотипное. – СПб., 2017.
3. *Полуянович Н.К., Тибейко И.А.* Эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. – Таганрог, 2014.
4. *Шурыкин А.А., Полуянович Н.К.* Оценка математического ожидания ресурса изоляции в задачах повышения надежности электрооборудования // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 2 (53). – С. 16.
5. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Бурьков Д.В.* Разработка метода прогнозирования процесса старения изоляции на основе термофлуктуационной теории частичных разрядов // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 3 (46). – С. 26.
6. *Серебряков Н.А., Хомутов С.О.* Анализ случайной составляющей временного ряда электрической нагрузки группы точек поставки электроэнергии сельхозпроизводителей // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2019. – № 5 (175). – С. 153-158.
7. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Неразрушающий метод прогнозирования остаточного ресурса силовых кабельных линий // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2012. – № 1 (8). – С. 27-33.
8. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.* Оценка воздействующих факторов и прогнозирование электропотребления в региональной энергосистеме с учетом режима ее эксплуатации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 2 (226). – С. 31-46.
9. *Рудаков Е., Саакян Ю., Нигматулин Б., Прохорова Н.* Цена расточительности // Эксперт. – Июнь 2008. – № 24.
10. *Билалова А.И.* Разработка моделей прогнозирования в сфере энергосбережения // Сб. научных трудов международной научно-технической конференции студентов и молодых ученых «Молодежь. Наука. Технологии (МНТК-2017)». – Новосибирск, 2017. – С. 11-15.
11. *Билалова А.И.* Статистика потребления электроэнергии в г. Ульяновск // Вузовская наука в современных условиях: Сб. материалов 48-й научно-технической конференции. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – С. 15-18.
12. *Доманов В.И., Билалова А.И.* Прогнозирование объемов энергопотребления в зависимости от исходной информации // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 59-65. – DOI: 10.14529/power160208.
13. *Кудрин Б.И., Мозгалин А.В.* Методика обеспечения почасового прогнозирования электропотребления предприятий с учетом погодных факторов // Вестник МЭИ. – 2007. – № 2. – С.45-47.
14. *Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Постовалов С.Н., Имитова Е.В.* Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 888 с.
15. *Спиридонова О.И.* Структура рынка электроэнергии: рынок форвардных контрактов и стимулы к молчаливому сговору // Современная конкуренция. – 2010. – № 5. – С. 15-24.
16. Патент 115098 РФ: МПК G06N 5/00. Многослойная нейронная сеть / *Белов К.Д.*; заявитель и патентообладатель: Белов К.Д. – № 2011139784/08; заявл. 29.09.2011; опубл. 20.04.2012; Бюл. № 11.
17. Патент 169425 РФ: МПК G06Q 10/06, G06N 5/00. Устройство прогнозирования электропотребления на основе многослойной нейронной сети / *Хамитов Р.Н.*; заявитель и патентообладатель: ФБГОУ ВО Омский Государственный Технический Университет. – № 2016145339; заявл. 18.11.2016; опубл. 17.03.2016.
18. Патент 222420 РФ: МПК G06N 5/00, G06Q 10/06. Устройство мониторинга и прогнозирования электропотребления в электроэнергетических системах на основе нейронных структур / *Каче-лаев О.В., Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.*; патентообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет». – № 2023126166; заявл. 12 октября 2023; опубл. 25 декабря 2023 г.
19. *Полуянович Н.К., Азаров Н.В., Дубяго М.Н.* Нейрокомпьютерное управление пропускной способностью кабельных сетей посредством учета и контроля их параметров // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 3 (227). – С. 84-100.
20. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.* Управление пропускной способностью энергосети в задачах прогнозирования электрической нагрузки // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 6 (230). – С. 30-43.

21. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.* Алгоритм обучения искусственной нейронной сети факторного прогнозирования ресурса изоляционных материалов силовых кабельных линий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 2. – С.59-73.
22. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Совершенствование методов диагностики и прогнозирования электроизоляционных материалов систем энергоснабжения: монография. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 192 с.

REFERENCES

1. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 9 sentyabrya 2023 g. N 1473 "Ob utverzhdenii kompleksnoy gosudarstvennoy programmy Rossiyskoy Federatsii "Energoberezhenie i povyshenie energeticheskoy effektivnosti". Razmeshchen v SPS "Konsultant Plyus" [Decree of the Government of the Russian Federation of September 9, 2023 N 1473 "On approval of the comprehensive state program of the Russian Federation "Energy saving and increasing energy efficiency". Posted in the ATP "Consultant Plus". – <https://base.garant.ru/407632842/>]. Available at: <https://base.garant.ru/407632842/>.
2. *Poluyanovich N.K.* Montazh, naladka, ekspluatatsiya i remont sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy. Dopushcheno UMO po obrazovaniyu v oblasti energetiki i elektrotekhniki v kachestve uchebnogo posobiya dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy, obuchayushchikhsya po spetsial'nosti 140610 – «Elektrooborudovanie i elektrokhozyaystvo predpriyatiy, organizatsiy i uchrezhdeniy» napravleniya podgotovki 140600 – «Elektrotekhnika, elektromekhanika i elektro-tekhologii». Ser. uchebniki dlya vuzov. Spetsial'naya literature [Installation, adjustment, operation and repair of power supply systems for industrial enterprises. The educational educational institution for education in the field of energy and electrical engineering has been approved as a teaching aid for students of higher educational institutions studying in the specialty 140610 – "Electrical equipment and electrical equipment of enterprises, organizations and institutions" in the direction of training 140600 – "Electrical engineering, electromechanics and electrical technology". Ser. textbooks for universities. Special literature]. 3rd ed. Saint Petersburg, 2017.
3. *Poluyanovich N.K., Tibeyko I.A.* Ekspluatatsiya i remont sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Operation and repair of power supply systems of industrial enterprises]. Taganrog, 2014.
4. *Shurykin A.A., Poluyanovich N.K.* Otsenka matematicheskogo ozhidaniya resursa izolyatsii v zadachakh povysheniya nadezhnosti elektrooborudovaniya [Estimation of the mathematical expectation of insulation life in problems of increasing the reliability of electrical equipment], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2019, No. 2 (53), pp. 16.
5. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K., Bur'kov D.V.* Razrabotka metoda prognozirovaniya protsessa stareniya izolyatsii na osnove termofluktuationnoy teorii chastichnykh razryadov [Development of a method for predicting the aging process of insulation based on the thermal fluctuation theory of partial discharges], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2017, No. 3 (46), pp. 26.
6. *Serebryakov N.A., Khomutov S.O.* Analiz sluchaynoy sostavlyayushchey vremennogo ryada elektricheskoy nagruzki gruppy toчек postavki elektroenergii sel'khozproizvoditeley [Analysis of the random component of the time series of electrical load of a group of electricity supply points for agricultural producers], *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Altai State Agrarian University], 2019, No. 5 (175), pp. 153-158.
7. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Nerazrushayushchiy metod prognozirovaniya ostatochnogo resursa silovykh kabel'nykh liniy [Non-destructive method for predicting the residual life of power cable lines], *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Informatics, computer technology and engineering education], 2012, No. 1 (8), pp. 27-33.
8. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N.* Otsenka vozdeystvuyushchikh faktorov i prognozirovanie elektropotrebleniya v regional'noy energosisteme s uchetom rezhima ee ekspluatatsii [Assessment of influencing factors and forecasting of electricity consumption in the regional energy system taking into account its operating mode], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 2 (226), pp. 31-46.
9. *Rudakov E., Saakyan Yu., Nigmatulin B., Prokhorova N.* Tsena rastochitel'nosti [The price of wastefulness], *Ekspert* [Expert]. Iyun' 2008, pp. 24.
10. *Bilalova A.I.* Razrabotka modeley prognozirovaniya v sfere energoberezheniya [Development of forecasting models in the field of energy saving], *Sb. nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh «Molodezh'. Nauka. Tekhnologii (MNTK-2017)»* [Collection of scientific papers of the international scientific and technical conference of students and young scientists "Youth. The science. Technologies (MNTK-2017)"]. Novosibirsk, 2017, pp. 11-15.

11. *Bilalova A.I.* Statistika potrebleniya elektroenergii v g. Ulyanovsk [Statistics of electricity consumption in Ulyanovsk], *Vuzovskaya nauka v sovremennykh usloviyakh: Sb. materialov 48-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [University science in modern conditions: Collection of materials of the 48th scientific and technical conference]. Ulyanovsk: UIGTU, 2013, pp. 15-18.
12. *Domanov V.I., Bilalova A.I.* Prognozirovanie ob"emov energopotrebleniya v zavisimosti ot iskhodnoy informatsii [Forecasting the volume of energy consumption depending on the initial information], *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of SUSU. Series "Energy"], 2016, Vol. 16, No. 2, pp. 59-65. DOI: 10.14529/power160208.
13. *Kudrin B.I., Mozgalin A.V.* Metodika obespecheniya pochasovogo prognozirovaniya elektropotrebleniya predpriyatiy s uchetom pogodnykh faktorov [Methodology for providing hourly forecasting of power consumption of enterprises taking into account weather factors], *Vestnik MEI* [Bulletin of MPEI], 2007, No. 2, pp.45-47.
14. *Lemeshko B.Yu., Lemeshko S.B., Postovalov S.N., Chimitova E.V.* Statisticheskiy analiz dannykh, modelirovanie i issledovanie veroyatnostnykh zakonomernostey. Komp'yuternyy podkhod: monografiya [Statistical data analysis, modeling and study of probabilistic patterns. Computer approach: monograph]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2011, 888 p.
15. *Spiridonova O.I.* Struktura rynka elektroenergii: rynek forwardnykh kontraktov i stimuly k molchalivomu sgovoru [The structure of the electricity market: the market for forward contracts and incentives for tacit collusion], *Sovremennaya konkurentsia* [Modern competition], 2010, No. 5, pp.15-24.
16. *Belov K.D.* Patent 115098 RF: MPK G06N 5/00. Mnogosloynnaya neyronnaya set' [Patent 115098 RF: MPK G06N 5/00 Multilayer neural network]; applicant and patent holder: Belov K.D. No. 2011139784/08; appl. 09.29.2011; publ. 04/20/2012; Bull. No. 11.
17. *Khamitov R.N.* Patent 169425 RF: MPK G06Q 10/06, G06N 5/00. Ustroystvo prognozirovaniya elektropotrebleniya na osnove mnogoslnoynoy neyronnoy seti [Patent 169425 RF: IPC G06Q 10/06, G06N 5/00. Device for forecasting power consumption based on a multilayer neural network]; applicant and patent holder: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Omsk State Technical University. – No. 2016145339; appl. 11/18/2016; publ. 03/17/2016.
18. *Kachelaev O.V., Poluyanovich N.K., Dubyago M.N.* Patent 222420 RF: MPK G06N 5/00, G06Q 10/06. Ustroystvo monitoringa i prognozirovaniya elektropotrebleniya v elektroenergeticheskikh sistemakh na osnove neyronnykh struktur [Patent 222420 RF: IPC G06N 5/00, G06Q 10/06. Device for monitoring and forecasting power consumption in electric power systems based on neural structures]; patent holder: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Southern Federal University". No. 2023126166; appl. October 12, 2023; publ. December 25, 2023.
19. *Poluyanovich N.K., Azarov N.V., Dubyago M.N.* Neyrokomp'yuternoe upravlenie propusknoy sposobnost'yu kabel'nykh setey posredstvom ucheta i kontrolya ikh parametrov [Neurocomputer control of the capacity of cable networks through accounting and control of their parameters], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 3 (227), pp. 84-100.
20. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N.* Upravlenie propusknoy sposobnost'yu energoseti v zadachakh prognozirovaniya elektricheskoy nagruzki [Controlling the capacity of the energy network in problems of forecasting electrical load], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 6 (230), pp. 30-43.
21. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N.* Algoritm obucheniya iskusstvennoy neyronnoy seti faktornogo prognozirovaniya resursa izolyatsionnykh materialov silovykh kabel'nykh liniy [Algorithm for training an artificial neural network for factor forecasting of the resource of insulating materials of power cable lines], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 2, pp. 59-73.
22. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Sovershenstvovanie metodov diagnostiki i prognozirovaniya elektroizolyatsionnykh materialov sistem energosnabzheniya: monografiya [Improving diagnostic methods and forecasting of electrical insulating materials for power supply systems: monograph]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, 192 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

Полуянович Николай Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: nik1-58@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89508609983; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Качелаев Олег Вадминович – e-mail: 22.olezhka@mail.ru; тел.: 89281163960; кафедра техносферной безопасности и химии; аспирант.

Дубяго Марина Николаевна – e-mail: w_m88@mail.ru; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Мальков Станислав Борисович – e-mail: sbmalkov@sfedu.ru; тел.: 89514917038; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Poluyanovich Nikolay Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: nik1-58@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79508609983; the Department of Electric Technics and Mechatronics; cand. of emg. sc.; associate professor.

Kachelaev Oleg Vadimovich – e-mail: 22.olezhka@mail.ru; phone: +79281163960; the Department of Techno-Sphere safety and Chemistry; postgraduate student.

Dubyago Marina Nikolaevna – e-mail: w_m88@mail.ru; phone: +79281758225; the Department of Electrical Engineering and Mechatronics. cand. of emg. sc.; associate professor.

Malkov Stanislav Borisovich – e-mail: sbmalkov@sfnedu.ru; phone: +79514917038; the Department of Electrical Engineering and Mechatronics; cand. of emg. sc.; associate professor.

УДК 531.383.11

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-219-230

Т.В. Сазонова, М.С. Шелагурова

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ НАВИГАЦИИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ДАННЫЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Рассмотрены методы навигации БПЛА, основанные на данных дистанционного зондирования Земли: аэро- или космо- фотоснимках высокого разрешения, обработанных специальным образом. Для видеонавигации используются ортонормированные фотоснимки местности, для навигации по микрорельефу – фотоснимки, обработанные методом стереофотограмметрии. Методы видеонавигации основаны на выделении и сопоставлении характерных точек на текущем и опорном изображениях. В зависимости от наличия эталонных данных в виде фотоснимков видеонавигация подразделяется на одометрическую и по привязке изображений к местности. Одометрическая навигация не требует эталонных данных, что является её положительной чертой, однако в её принципы работы заложено нарастание ошибок определения навигационных параметров. Видеонавигация по привязке изображения обеспечивает более высокие точностные характеристики, но требует предварительной подготовки эталонных данных и использования бортовых вычислителей с большим объемом памяти. Разработанные методы видеонавигации проверены путем математического моделирования, результаты которого показали, что целесообразно комбинировать эти два метода. В этом случае ожидаемая точность навигации БПЛА с использованием предложенных методов сопоставима с точностью СНС. Реализация методов видеонавигации в бортовом вычислителе на базе одноплатного модуля NVIDIA Jetson TX2 показала их работоспособность в реальном масштабе времени. Методы навигации по микрорельефу основываются на поисковом оценивании координат БПЛА в пределах доверительного квадрата. Результаты математического моделирования навигации по микрорельефу показали, что метод работоспособен с высокой (3-8 м) точностью как при полете БПЛА над антропогенной местностью, так и при полете над естественным объектовым составом. Реализация навигации по микрорельефу в бортовом вычислителе, построенном на модуле Салют-Л 24ПМ2 РАЯЖ.441461.031, показала её работоспособность в реальном масштабе времени. Предложенные методы видеонавигации и навигации по микрорельефу были успешно апробированы на стенде полунатурного моделирования. В ближайшее время предполагаются их летные испытания. Для практической реализации разработанных методов высокоточной навигации необходимо решить вопрос с обеспечением потребителя эталонными данными, полученными на основе оперативной обработки актуальных космо- или аэро- фотоснимков местности высокого разрешения.

Видеонавигация; микрорельеф; дистанционное зондирование Земли; лазерный дальномер; детектор; детектор.

T.V. Sazonova, M.S. Shelagurova

INVESTIGATION OF ACCURACY CHARACTERISTICS OF NAVIGATION SYSTEMS USING REMOTE SENSING DATA

The article considers methods of the navigation for Unmanned Aerial Vehicles (UAV) based on the Earth remote probe data, i.e. high resolution aerial or space photographs which are specially processed. For video navigation, there are used orthonormal photographs of areal; for micros relief navigation, there are processed photographs by stereophotogrammetry method. The methods of video navigation are based

on the separation and comparison of characteristic points in the current and reference images. Depending on the available reference data as the photographs, the video navigation divides between the connections of terrain to the images and the odometry. The odometer navigation does need reference data which is its positive feature, but the principles of odometer navigation enclosure in an increase of errors along measurements of the navigation parameters. The video navigation with the connections of terrain to the images provides more accurate characteristics, but it requires a preliminary preparation of reference data and uses an on-board computer with a large memory capacity. The created methods of video navigation are examined by the mathematic modelling. The results demonstrated that it is advantageous to combine both methods. In this case, the expected accuracy of the UAV navigation using the introduced methods is comparable to accuracy of a satellite navigation system. The realization of video navigation methods in an on-board computer based on NVIDIA Jetson TX2 single-board module demonstrated its efficiency in real time. The methods of the navigation by micro relief are based on a search estimation of UAV coordinates within the limits of the confidential square. The results of mathematics modelling of the micro relief navigation demonstrated that this method is serviceable with a high accuracy (3 to 8 m) both in the UAV flights over a man-made environment and in the UAV flights over a natural objects composition. The realization of navigation by the micro relief in an on-board computer build with Salut-EL24PM2 RAYaZh.441461.031 module demonstrated its serviceability in real time. The introduced methods of video navigation and navigation by micro relief were successfully approved with a semi-natural modelling. In near time, the flight tests will be intended. For practical realization of the created methods for the high-precision navigation, it is required to resolve this question providing the user with referent data which should obtain the operative processing for actual space-and-aerial photographs with the high resolution against the area.

Video navigation; microrelief; remote sensing of the Earth; laser rangefinder; descriptor; detector.

Введение. В настоящее время актуальной задачей является обеспечение высокоточной автономной навигации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в условиях неработоспособности глобальных спутниковых навигационных систем (СНС). Для этого можно использовать данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) - результаты аэрофотосъемки или космофотосъемки, обработанные для использования в системах коррекции навигационных параметров БПЛА.

В данной статье рассматриваются два новых метода, основанных на использовании данных ДЗЗ:

- ◆ видеонавигация;
- ◆ навигация по микрорельефу.

Для решения задачи видеонавигации используются ортонормированные фотоснимки местности высокого разрешения (порядка 2 м) с плановой привязкой не хуже 1–2 м. Для решения задачи навигации по микрорельефу фотоснимки местности обрабатываются методом стереофотограмметрии [1], в результате чего формируется мелкоструктурное поле – микрорельеф, представляющий собой сумму рельефа и высот расположенного на нем объектового состава (ОС) искусственного и естественного происхождения. Точность карт микрорельефа – порядка 1–2 м в плане и по высоте, дискрет записи – 1–2 м.

Ниже будут рассмотрены вышеуказанные методы навигации, приведены результаты моделирования по оценке их точностных характеристик и возможности реализации в реальном масштабе времени в бортовых вычислителях.

Методы видеонавигации. В зависимости от наличия эталонных данных о местности методы видеонавигации можно разделить на две группы:

- ◆ одометрическая видеонавигация, в которой по характеру перемещения характерных точек (ХТ) изображения определяется изменение положения и ориентации самой камеры;
- ◆ видеонавигация по привязке изображения к эталонным данным о местности.

В основе предлагаемых методов видеонавигации лежит выделение информации о ХТ на опорном и текущем изображении, их сопоставление и определение сдвигов по положению и ориентации камеры [2]. Основным отличием является то, что в случае одометрической видеонавигации опорным изображением является ранее полученное изображение с камеры, а в случае видеонавигации по привязке изображения – синтезированное по эталонным данным изображение.

Основные этапы работы данных методов видеонавигации:

Этап 1 – только для метода видеонавигации по привязке изображения: синтез опорного изображения по эталонным данным;

Этап 2 – распознавание и сопоставление ХТ на опорном и текущем изображении;

Этап 3 – определение поправок к координатам и углам, при которых получен опорный кадр (в случае одометрической навигации поправки будут определять изменение положения БПЛА при пролете от опорного до текущего изображения).

Этап 1. Синтез опорного изображения проводится по фотоснимкам высокого разрешения (не хуже 2 м), матрице рельефа местности с дискретом не более 2" и данным о положении БПЛА и углах установки камеры.

Для реализации синтеза изображения на борту БПЛА в реальном масштабе времени фотоснимки и рельеф местности готовятся в специальном бортовом формате. Используется предложенная в [3] глобальная система записи координат. Выделяются 3 неполярные широтные зоны: от 0° до $\pm 60^\circ$, от $\pm(60^\circ$ до $76^\circ)$, от $\pm(76^\circ$ до $84^\circ)$ и 2 полярные. Широтные зоны были выбраны по критерию уменьшения средней линии цилиндра проецирования примерно вдвое и отличаются дискретизацией записи информации по долготу. При этом для неполярных зон используется прямоугольная система координат «широта/долгота», а для полярных зон - полярная азимутальная эквидистантная проекция.

Бортовая база фотоснимков готовится в виде монохромных (серых) текстур с размером, кратным 2, и тем же размером текселя, что и исходный фотоснимок, порядка 2 м. После формирования бортовых фотоснимков в виде текстур к ним применяется метод сжатия S3TC, поддерживаемый графической библиотекой OpenGL, используемой при синтезе опорного изображения.

Примеры синтезированного опорного изображения приведены на рис. 1.

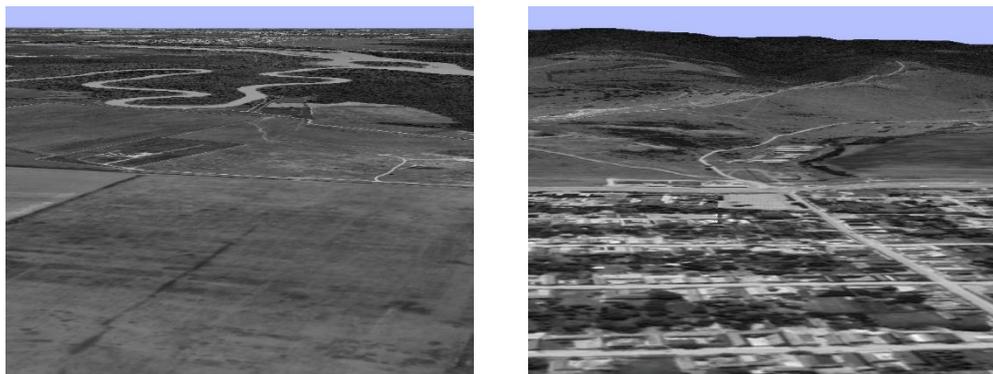


Рис. 1. Примеры синтезированного опорного изображения

Этап 2. К классическим методам распознавания ХТ на изображении можно отнести использование различных детекторов и дескрипторов. Детекторы выделяют на изображении особые точки, а дескрипторы формируют описательные элементы, инвариантные к изменению масштаба и поворота изображения. На сегодняшний день существует достаточно большое количество детекторов и дескрипторов, описанных в открытой библиотеке алгоритмов компьютерного зрения OpenCV.

Анализ технической литературы [4-10] показал, что наиболее эффективными детекторами являются: SURF, FAST, SIFT, KAZE, AKAZE и BRISK, а среди дескрипторов выделяются: SURF, BEBLID и BRIEF.

Математическое моделирование по выбору детекторов и дескрипторов проводилось с использованием зарегистрированных видеоизображений экспериментального образца многофункциональной системы технического и виртуального зрения (МСТВЗ), полученных в ходе летных исследований в районе аэродрома г. Воскресенска на самолете С-42. Характеристики телевизионной камеры, изображения с которой обрабатывались, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики телевизионной камеры МСТВЗ

Наименование параметра	Значение
Максимальное разрешение	2592x1944 при частоте 12 кадров/с
Максимальная частота кадров	25 кадров/с
Цвет	Цвет/ЧБ
Угол обзора	20°-40°

В ходе математического моделирования оценивались следующие характеристики по каждому исследуемому детектору и дескриптору:

- ◆ количество детектируемых точек на изображении;
- ◆ количество точек, совпавших на обоих изображениях;
- ◆ время выполнения операций, включая обнаружение особых точек, их описания через дескрипторы и сопоставление особых точек на паре изображений путем сравнения их дескрипторов.

В табл. 2 приведены результаты математического моделирования с наиболее приемлемым результатом выполнения операций по времени и количеству правильно опознанных точек (не менее 10).

Таблица 2

Результаты исследования детекторов и дескрипторов

Детектор	Дескриптор	Время распознавания на исходном изображении, сек	Время распознавания на изображении со сдвигом, сек	Время сопоставления, сек
SURF	SURF	0,100794	0,107354	0,001344
SURF	BEBLID	0,103892	0,095117	0,000288
SIFT	BEBLID	0,348751	0,345608	0,000660
KAZE	BEBLID	1,438133	1,455424	0,000164
AKAZE	BEBLID	0,262233	0,250903	0,000396
FAST	BEBLID	0,040212	0,036701	0,000369
BRISK	BEBLID	0,097899	0,099186	0,000699
FAST	BRIEF	0,095193	0,092076	0,000367

Анализ табл. 2 показал, что наиболее оптимальным является сочетание детектора FAST и дескриптора BEBLID.

На рис. 2 показан пример результата работы детектора FAST и дескриптора BEBLID по обнаружению и сопоставлению характерных точек на двух изображениях, полученных со сдвигом по времени на 0,5 сек.

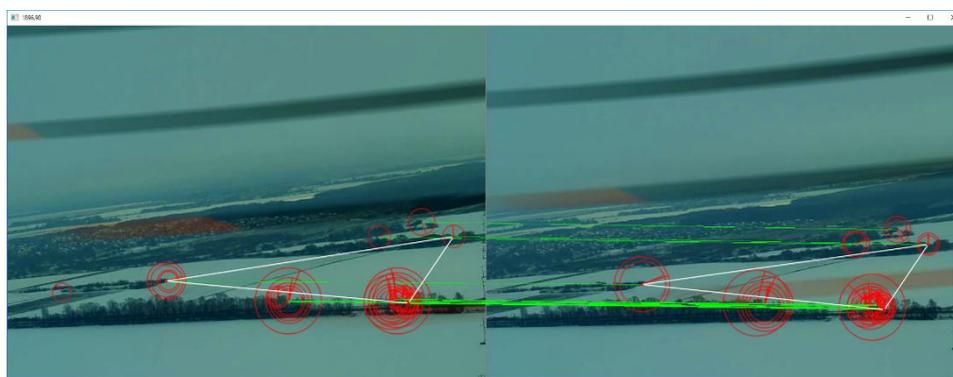


Рис. 2. Пример результата работы детектор FAST и дескриптора BEBLID

Этап 3. На третьем этапе для опорного изображения определяется матрица преобразований \mathbf{M} из мировой системы координат (СК) в видовую, использующая направляющие косинусы, вычисленные по данным об углах эволюции (крен, курс, тангаж) БПЛА и углах установки камеры.

Важно отметить, что для реализации дальнейших вычислений целесообразно даже для одометрической видеонавигации иметь на борту БПЛА матрицу рельефа местности. Если информация о рельефе отсутствует, то поверхность под БПЛА аппроксимируется плоскостью, высота которой определяется разницей между барометрической и геометрической высотами БПЛА.

По экраным координатам ХТ опорного изображения путем последовательных обратных преобразований с использованием вышеупомянутой матрицы \mathbf{M} определяется соответствующая трехмерная линия в мировой СК, ищется точка её пересечения с поверхностью рельефа местности и определяются трехмерные координаты ХТ в мировой СК. Если количество сопоставленных ХТ равно или больше 3-х, то зная их экраные координаты на текущем изображении, можно найти неизвестные параметры, входящие в матрицу \mathbf{M} для текущего изображения, а именно координаты, высоту и углы эволюции. Для этого решается система нелинейных уравнений с использованием методов Ньютона и Гаусса.

Математическое моделирование методов видеонавигации по оценке их точностных характеристик [11–16] показало, что метод по привязке изображений к эталонным данным о местности обеспечивает следующие точностные характеристики:

- ◆ порядка 5-12м (σ) по широте и долготе,
- ◆ 4-7м (σ) по высоте,
- ◆ 0,1-0,3°(σ) по крену и тангажу,
- ◆ 0,03-0,1°(σ) по курсу.

Оценка погрешностей одометрической видеонавигации показала, что со временем их значения существенно возрастают и могут достигать сотни метров при определении координат ЛА. Параметры кривой роста погрешностей одометрической видеонавигации зависят от скорости полета ЛА, качества сопоставления ХТ и наличия информации о рельефе местности.

Бортовая реализация методов видеонавигации проводилась на стенде полунатурного моделирования (ПНМ) с использованием одноплатного модуля NVIDIA Jetson TX2 (рис. 3), установленного на эталонной несущей плате Mini-ITX (170x170мм).



Рис. 3. Внешний вид модуля NVIDIA Jetson TX2, установленного на Mini-ITX

Основные технические характеристики модуля NVIDIA Jetson TX2:

- ◆ видеопроцессор GPU NVIDIA Pascal (256 ядер) тактовая частота 1300 МГц;
- ◆ центральный процессор ARM Cortex-A57 (четыре ядра) 2 ГГц + NVIDIA Denver2 (два ядра) 2 ГГц;
- ◆ оперативная память 8 Гбайт LPDDR4;
- ◆ интегрированный накопитель SSD eMMC 32 Гбайта;

- ◆ интерфейсы USB 3.0, 2.0, UART, SPI, I2C, I2S, GPIO, 2 x CAN, Ethernet;
- ◆ размер 50x87 мм, вес 85 г, мощность потребления 7,5 Вт.

С целью обеспечения функционирования программно-математического обеспечения (ПМО) видеонавигации по фотоснимкам местности, реализованного в модуле NVIDIA Jetson TX2, в его память (SSD) были загружены бортовая база данных фотоснимков местности объемом 5,28 Гб и карта рельефа объемом 10 Мб. ПМО видеонавигации разработано на языке C++ в виде программных модулей с использованием функций библиотек OpenGL и OpenCV.

Для обеспечения динамики движения БПЛА, показаний инерциальной навигационной системы (ИНС) и формирования изображений камеры использовался персональный компьютер, установленный на стенде ПНМ.

Для формирования изображения камеры в персональном компьютере использовались 10x10 фотоснимков местности размером 5x5 км района Кавказа (рис. 4) с разрешением от 1 до 2,5 м.



Рис. 4. Примеры фотоснимков района Кавказа размером 5x5 км

Технические характеристики имитируемой камеры приведены в табл. 4.

Таблица 4

Технические характеристики телевизионной камеры

ТХ	ТВ-камера 2
Оптический диапазон, мкм	0,38 – 0,75(цветное)
Поле зрения	20° × 15°
Размер кадра, пиксель	3200 × 2400
Отклонение оптической оси по тангажу	0°/ -15°
Частота выдачи изображения	1 Гц (не менее)

Изображение камеры поступало по интерфейсу Ethernet в модуль NVIDIA Jetson TX2. Каждое изображение сопровождалось информацией о навигационных параметрах (широта, долгота, высота и углы эволюции), полученных от ИНС.

При исследованиях задавался полет БПЛА на высоте над поверхностью около 500 м со скоростью 65 м/с. Выходом работы ПМО видеонавигации являлись поправки к навигационным параметрам ИНС, которые учитывались при формировании движения БПЛА.

На рис. 5 приведена иллюстрация выделения и сопоставления ХТ на синтезированном изображении (слева) и изображении от камеры (справа) с помощью ПМО видеонавигации, реализованном в модуле NVIDIA Jetson TX2 на стенде ПНМ.

Проведенные исследования бортовой реализации методов видеонавигации в модуле NVIDIA Jetson TX2 показали следующие результаты:

1. Время расчетов по формированию одного цикла поправок в ПМО видеонавигации меняется в диапазоне от 100 мс до 140 мс.

2. Точность метода по привязке изображений к местности соответствует результатам математического моделирования, однако формирование достоверных поправок производится достаточно редко.

3. Достоверные поправки к навигационным параметрам при одометрической видеонавигации формируются практически на каждом шаге, однако их погрешность растет со временем наблюдения и достигает сотни метров.

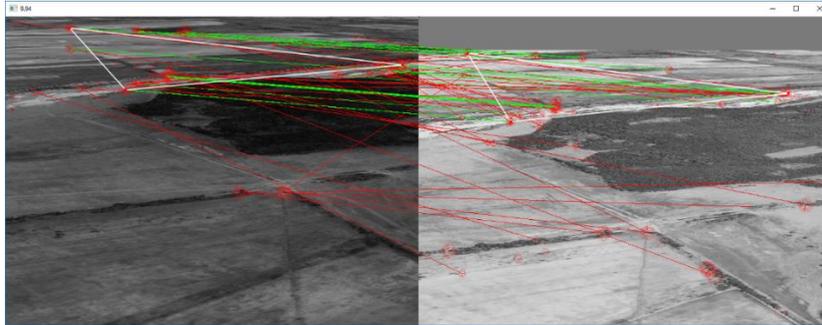


Рис. 5. Иллюстрация выделения и сопоставления ХТ на синтезированном изображении (слева) и изображении от камеры (справа)

Таким образом, можно сделать следующие выводы: во-первых, разработанное ПМО видеонавигации реализуемо в реальном масштабе времени на бортовых вычислителях, а, во-вторых, целесообразно использовать комплексирование методов одометрической видеонавигации и по привязке изображений к местности.

Навигация по микрорельефу.

В связи с развитием технологий получения с высоким разрешением данных о микрорельефе появилась возможность его использования для высокоточной коррекции координат БПЛА [18–20]. В качестве датчика микрорельефа используется лазерный дальномер, обеспечивающий высокоточное измерение геометрической высоты. Для формирования карт микрорельефа используются данные ДЗЗ.

Целью исследований являлась оценка точностных характеристик КЭНС по микрорельефу с искусственным и естественным ОС. Исследования проводились методом математического моделирования с использованием реальных картографических данных на участок городской застройки г. Коломна и участок с естественным ОС под г. Нижний Тагил (Н.Тагил).

Микрорельеф на участки г. Коломна размером 5100x5900 кв. м и под г. Н. Тагил размером 9650x10350 кв. м (рис. 6) был подготовлен на основе обработки космофотоснимков. Дискрет записи микрорельефа 1 м, погрешность картографирования: в плане 1-2 м, по высоте 2 м.

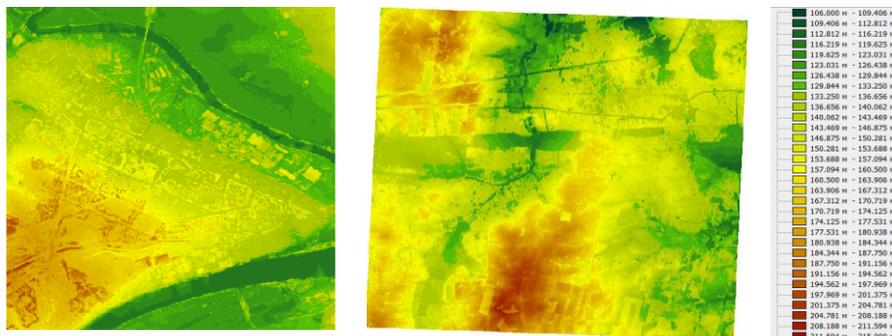


Рис. 6. Микрорельеф на участки г. Коломна (слева) и под г. Н. Тагил (справа)

Оценка информативности показала, что среднеквадратическое отклонение (СКО) микрорельефа на данных участках практически одинаково – порядка 6 м, а радиусы корреляции отличаются почти вдвое: 38 м г. Коломна и 65 м под Н. Тагилом.

При математическом моделировании в качестве датчика микрорельефа рассматривался лазерный дальномер LRF03C01S [17], измеряющий профиль подстилающей поверхности с погрешностью 1 м на высотах до 3000 м в простых метеусловиях (рис. 7).



Рис. 7. Внешний вид лазерного дальномера LRF03C01S

Имитировался тот же полет, что и при видеонавигации: на высоте 500 м со скоростью 65 м/с в условиях неработоспособности СНС. При этом среднеквадратические погрешности (СКП) определения параметров навигационной системы принимали следующие значения:

- ◆ СКП определения углов ориентации (курса, крена, тангажа) – 1°;
- ◆ СКП определения путевой скорости – 3 м/с;
- ◆ СКП определения координат (априорная погрешность) 100 м и 300 м.

В ходе моделирования оценивались следующие параметры:

- ◆ число проведенных коррекций;
- ◆ средняя длина зоны коррекции по микрорельефу;
- ◆ точность КЭНС по микрорельефу (круговая СКП).

Алгоритм КЭНС по микрорельефу базируется на поисковом функционале [3], рассчитывающем квадрат разности центрированных эталонного и текущего значений, при этом вводится «затухание» веса функционалов, рассчитанных на предыдущих шагах, что является весьма актуальным при нестационарном микрорельефе. В ходе работы алгоритма проводится селекция грубых ошибок датчика на основе знания минимального и максимального эталонного значений микрорельефа в пределах доверительного квадрата и ошибок лазерного дальномера.

В табл. 5 и 6 сведены результаты математического моделирования КЭНС по микрорельефу.

Таблица 5

Результаты КЭНС по микрорельефу по участку Коломна

Априорная погрешность, м	Дискрет d_i , м	Число коррекций	Средняя длина коррекции, м	СКП коррекции круговая, м
100	2	228	331,43	2,15
	3	225	270,33	2,75
	4	225	252,81	3,14
	5	148	259,05	3,77
	6	115	269,56	4,21
	7	95	462,27	4,86
300	3	134	299,01	4,60
	4	115	273,66	4,21
	5	86	274,48	4,22
	6	50	276,91	4,26
	7	53	525,73	8,09

Таблица 6

Результаты КЭНС по микрорельефу по участку под Н. Тагил

Априорная погрешность, м	Дискрет di , м	Число коррекций	Средняя длина коррекции, м	СКП коррекции круговая, м
100	2	292	581,94	3,45
	3	328	431,70	3,87
	4	422	357,93	4,08
	5	418	313,00	4,79
	6	420	274,49	5,48
	7	306	466,03	5,60
300	3	294	451,67	4,26
	4	295	382,33	4,63
	5	275	340,70	5,52
	6	249	297,05	5,00
	7	188	483,12	6,65

Анализ приведенных в табл. 5 и 6 данных показывает, что точностные характеристики КЭНС при полете ЛА над городской застройкой и естественным ОС сопоставимы с точностью СНС в дифференциальном режиме.

Бортовая реализация КЭНС по микрорельефу исследовалась на стенде ПНМ с использованием модуля Салют-ЭЛ24ПМ2 РАЯЖ.441461.031 (см. рис.8), основные технические характеристики которого приведены ниже:

- ◆ тактовая частота процессора: до 816 МГц CPU, до 672 МГц DSP;
- ◆ ОЗУ: 2 x 1 Гбайт (DDR3L), 504 МГц;
- ◆ ПЗУ: 4 Гбайт (NAND Flash), 32 Гбайт (eMMC), 4 Мбайт (SPI Flash);
- ◆ интерфейсы: RS485, UART, Ethernet;
- ◆ масса 25 г, размеры 60,0×60,0×5,5 мм, мощность потребления 5 Вт.



Рис. 8. Внешний вид модуля Салют- Л24ПМ2

Оценка среднего времени расчета одного такта коррекции показала её работоспособность в реальном масштабе времени.

Заключение. Проведенные исследования показали, что ожидаемая точность определения навигационных параметров БПЛА с использованием методов ландшафтной навигации (видеонавигации и навигации по микрорельефу) сравнима с точностью спутниковой навигации. В ближайшее время планируются летные исследования методов ландшафтной навигации, в ходе которых будут получены реальные оценки их точностных характеристик. Предложенные в статье методы ландшафтной навигации реализуемы в бортовых вычислителях, однако они требуют подготовки эталонных данных на основе обработки фотоснимков местности высокого разрешения. В настоящее время уже разработаны методы получения эталонных данных для ландшафтной навигации на основе об-

работки космофотоснимков местности. Приведенные в данной статье результаты математического моделирования ландшафтной навигации базировались на эталонных данных, созданных именно такими методами. Основным требованием при создании эталонов ландшафтной навигации является использование актуальных космофотоснимков. Для практической реализации рассмотренных методов навигации БПЛА необходимо решить вопрос о создании и оперативном обновлении базы данных ортонормированных фотоснимков высокого разрешения и матриц микрорельефа. Доступ к базе данных должен осуществляться авторизованными потребителями удаленно, при этом должен быть реализован интерактивный интерфейс оператора по выбору картографируемых участков, типа эталонных данных и передаче информации потребителю.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козин Е.В., Карманов А.Г., Карманова Н.А. Фотограмметрия. – СПб.: Университет ИТМО, 2019.
2. Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Исследование алгоритмов выделения и сопоставления особых точек на изображениях от датчиков технического зрения // Матер. XVI Всероссийской мультиконференции по проблемам управления. Т. 3. – Волгоград, 2023. – С. 61-64.
3. Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Геоинформация в комплексах бортового оборудования летательных аппаратов: монография. – М., 2018.
4. Bay H. et al. Speeded-up robust features (SURF) // Computer vision and image understanding. – 2008. – Vol. 110, No. 3. – P. 346-359.
5. Компьютерное зрение OpenCV 4.5.1 // Open CV Сопоставление изображений SLAM BEBLID.
6. Rublee E. et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF // 2011 International conference on computer vision. – IEEE, 2011. – P. 2564-2571.
7. Alcantarilla P.F., Bartoli A., Davison A.J. KAZE features // European conference on computer vision. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. – P. 214-227.
8. Yang X., Cheng K.T. An ultra-fast feature for scalable augmented reality // IEEE, ACM Intl. Sym. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). – 2012. – P. 49-57.
9. Viswanathan D.G. Features from accelerated segment test (fast) // Proceedings of the 10th workshop on image analysis for multimedia interactive services, London, UK. 2009. – P. 6-8.
10. Leutenegger S., Chli M., Siegwart R.Y. BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints // 2011 International conference on computer vision. – IEEE, 2011. – P. 2548-2555.
11. Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Исследование точностных характеристик алгоритмов видеонавигации по привязке изображений к местности // Сб. тезисов докладов V-ой Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем». ФГУП «ГосНИИАС». Москва, 2023. – С. 339-341.
12. Леуцук О.Г., Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Результаты исследований реализации метода видеонавигации по фотоснимкам местности на бортовых вычислителях // Сб. тезисов докладов V-ой Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем». ФГУП «ГосНИИАС», Москва, 2023. – С. 334-335.
13. Леуцук О.Г., Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Оценка точностных характеристик метода одометрической видеонавигации // Сб. тезисов докладов V-ой Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем». ФГУП «ГосНИИАС», Москва, 2023. – С. 332-333.
14. Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Сравнительные оценки точности видеонавигации по привязке изображений к местности и одометрической видеонавигации // Сб. тезисов докладов 22-й Международной конференции «Авиация и космонавтика». МАИ, Москва, 2023. – С. 168-169.
15. Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Исследование методов видеонавигации для летательных аппаратов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2024. – № 1. – С. 36-43.
16. Леуцук О.Г., Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Разработка и реализация методов видеонавигации для беспилотных летательных аппаратов // Сб. трудов научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Интеллектуальные системы наведения высокоточного оружия». Ч. 3. Геоинформационные платформы военного назначения. Технополис «Эра», Анапа, 2023. – С. 4-13.
17. Техническая спецификация лазерного дальномера LRF03C01S.
18. Сазонова Т.В., Шелагурова М.С., Корнева Е.Г. Исследование режима экстремальной коррекции по полю рельефа методом математического моделирования с использованием результатов летных испытаний // Автоматизация. Современные технологии. – № 2021/05.

19. Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Автономная высокоточная навигация летательных аппаратов по микрорельефу с искусственным и естественным объектовым составом // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2024. – № 2. – С. 25-29.
20. Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Автономная высокоточная навигация летательных аппаратов по микрорельефу с искусственным и естественным объектовым составом // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика.. – 2024. – № 2. – С. 25-29.

REFERENCES

1. Kozin E.V., Karmanov A.G., Karmanova N.A. Fotogrammetriya [Photogrammetry]. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2019.
2. Sazonova T.V., Shelagurova M.S. Issledovanie algoritmov vydeleniya i sopostavleniya osobykh tochek na izobrazheniyakh ot datchikov tekhnicheskogo zreniya [Research of algorithms for identifying and comparing special points in images from technical vision sensors], *Mater. XVI Vserossiyskoy mul'tikonferentsii po problemam upravleniya* [Proceedings of the XVI All-Russian Multi-Conference on Control Problems]. Vol. 3. Volgograd, 2023, pp. 61-64.
3. Sazonova T.V., Shelagurova M.S. Geoinformatsiya v kompleksakh bortovogo oborudovaniya letatel'nykh apparatov: monografiya [Geoinformation in on-board equipment systems of aircraft: monograph]. Moscow, 2018.
4. Bay H. et al. Speeded-up robust features (SURF), *Computer vision and image understanding*, 2008, Vol. 110, No. 3, pp. 346-359.
5. Komp'yuternoe zrenie OpenCV 4.5.1//Open CV Sopostavlenie izobrazheniy SLAM BEBLID [Computer Vision OpenCV 4.5.1//Open CV Image Matching SLAM BEBLID].
6. Rublee E. et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF, *2011 International conference on computer vision*. IEEE, 2011, pp. 2564-2571.
7. Alcantarilla P.F., Bartoli A., Davison A.J. KAZE features, *European conference on computer vision*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, pp. 214-227.
8. Yang X., Cheng K.T. An ultra-fast feature for scalable augmented reality, *IEEE, ACM Intl. Sym. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 2012, pp. 49-57.
9. Viswanathan D.G. Features from accelerated segment test (fast), *Proceedings of the 10th workshop on image analysis for multimedia interactive services, London, UK, 2009*, pp. 6-8.
10. Leutenegger S., Chli M., Siegwart R.Y. BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints, *2011 International conference on computer vision*. IEEE, 2011, pp. 2548-2555.
11. Sazonova T.V., Shelagurova M.S. Issledovanie tochnostnykh kharakteristik algoritmov videonavigatsii po privyazke izobrazheniy k mestnosti [Study of the accuracy characteristics of video navigation algorithms for linking images to terrain], *Sb. tezisov dokladov V-oy Vserossiyskoy na-uchno-tekhnicheskoy konferentsii «Modelirovanie aviatsionnykh sistem»*. FGUP «GosNIIAS». Moskva, 2023 [Collection of abstracts of reports of the V-th All-Russian Scientific and Technical Conference “Modeling of Aviation Systems”. FSUE “GosNIIAS”. Moscow, 2023], pp. 339-341.
12. Leshchuk O.G., Sazonova T.V., Shelagurova M.S. Rezul'taty issledovaniy realizatsii metoda videonavigatsii po fotosnimkam mestnosti na bortovykh vychislitel'yakh [Results of research on the implementation of the method of video navigation using photographs of the area on on-board computers], *Sb. tezisov dokladov V-oy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Modelirovanie aviatsionnykh sistem»*. FGUP «GosNIIAS», Moskva, 2023 [Collection of abstracts of reports of the V-th All-Russian scientific and technical conference “Modeling of aviation systems”. FSUE “GosNIIAS”, Moscow, 2023], pp. 334-335.
13. Leshchuk O.G., Sazonova T.V., Shelagurova M.S. Otsenka tochnostnykh kharakteristik metoda odometrichekoy videonavigatsii [Assessment of the accuracy characteristics of the odometric video navigation method], *Sb. tezisov dokladov V-oy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Modelirovanie aviatsionnykh sistem»*. FGUP «GosNIIAS», Moskva, 2023 [Collection of abstracts of the V-th All-Russian Scientific and Technical Conference “Modeling of Aviation Systems”. FSUE “GosNIIAS”, Moscow, 2023], pp. 332-333.
14. Sazonova T.V., Shelagurova M.S. Sravnitel'nye otsenki tochnosti videonavigatsii po privyazke izobrazheniy k mestnosti i odometrichekoy videonavigatsii [Comparative assessments of the accuracy of video navigation for georeferencing images and odometric video navigation], *Sb. tezisov dokladov 22-y Mezhdunarodnoy konferentsii «Aviatsiya i kosmonavtika»*. MAI, Moskva, 2023 [Collection of abstracts of the 22nd International Conference “Aviation and Cosmonautics”. MAI, Moscow, 2023], pp. 168-169.
15. Sazonova T.V., Shelagurova M.S. Issledovanie metodov videonavigatsii dlya letatel'nykh apparatov [Research of video navigation methods for aircraft], *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics], 2024, No. 1, pp. 36-43.

16. *Leshchuk O.G., Sazonova T.V., Shelagurova M.S.* Razrabotka i realizatsiya metodov videonavigatsii dlya bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Development and implementation of video navigation methods for unmanned aerial vehicles], *Sb. trudov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya sovremennoy nauki po napravleniyu «Intellektual'nye sistemy navedeniya vysokotochnogo oruzhiya». Ch. 3. Geoinformatsionnye platformy voennogo naznacheniya. Tekhnopolis «Era», Anapa., 2023* [Collection of proceedings of the scientific and technical conference "State and prospects for the development of modern science in the direction of "Intelligent guidance systems for high-precision weapons". Part 3. Geoinformation platforms for military purposes. Technopolis "Era", Anapa., 2023], pp. 4-13.
17. Tekhnicheskaya spetsifikatsiya lazernogo dal'nomera LRF03C01S [Technical specification of laser rangefinder LRF03C01S].
18. *Sazonova T.V., Shelagurova M.S., Korneva E.G.* Issledovanie rezhima ekstremal'noy korrektsii po polyu rel'efa metodom matematicheskogo modelirovaniya s ispol'zovaniem rezul'tatov letnykh ispytaniy [Study of the regime of extreme correction along the relief field by the method of mathematical modeling using the results of flight tests], *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* [Automation. Modern technologies], No. 2021/05.
19. *Sazonova T.V., Shelagurova M.S.* Avtonomnaya vysokotochnaya navigatsiya letatel'nykh apparatov po mikrorel'efu s iskusstvennym i estestvennym ob'ektovyim sostavom [Autonomous high-precision navigation of aircraft over microrelief with artificial and natural object composition], *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Instruments and systems. Management, control, diagnostics], 2024, No. 2, pp. 25-29.
20. *Sazonova T.V., Shelagurova M.S.* Avtonomnaya vysokotochnaya navigatsiya letatel'nykh apparatov po mikrorel'efu s iskusstvennym i estestvennym ob'ektovyim sostavom [Autonomous high-precision navigation of aircraft over microrelief with artificial and natural object composition], *Pribory i sistemy. Upravlenie. Kontrol'. Diagnostika* [Instruments and systems. Control. Control. Diagnostics], 2024, No. 2, pp. 25-29.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

Сазонова Татьяна Владимировна – Акционерное общество «Раменское Приборостроительное конструкторское бюро (АО «РПКБ»); e-mail: tsazonova@rpkb.ru; г. Раменское, Россия; тел.: 89166834878; действительный член Академии Навигации и Управления Движением; д.т.н.; главный конструктор.

Шелагурова Марина Сергеевна – e-mail: marinashell@mail.ru; тел.: 89166143940; действительный член Академии Навигации и Управления Движением по секции молодых ученых; к.т.н.; начальник лабораторного сектора.

Sazonova Tatyana Vladimirovna – Joint Stock Company "Ramenskoye Design Company (JSC RDC)"; e-mail: tsazonova@rpkb.ru; Ramenskoye, Russia; phone: +79166834878; full member of the Academy of Navigation and Traffic Control; dr. of eng. sc.; chief designer.

Shelagurova Marina Sergeevna – e-mail: marinashell@mail.ru; phone: +79166143940; full member of the Academy of Navigation and Traffic Control of a section of young scientists; cand. of eng. sc.; head of the laboratory sector.

УДК 621.5

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-230-242

В.В. Дядичев, С.Г. Менюк, Д.С. Менюк

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА ОТ БАССЕЙНА ВЫДЕРЖКИ С ДВУХФАЗНЫМ КОЛЬЦЕВЫМ ТЕРМОСИФОНОМ

Цель данного исследования заключается в создании компьютерной модели, которая будет использоваться для улучшения системы пассивного отвода тепла от бассейна выдержки с двухфазным кольцевым термосифоном. Данная модель позволит провести анализ работы системы, определить набор квазиоптимальных решений для ее параметров и улучшить эффективность отвода тепла. Разработка такой модели может помочь улучшить процессы теплообмена и повысить эффективность работы системы в целом. **Метод.** Для решения поставленной задачи ис-

пользовались методы математического и компьютерного моделирования, производилось изучение механизмов передачи тепла в системе и определение оптимальных параметров для эффективного отвода тепла, а также сравнение различных вариантов конструкции и параметров системы для выбора наиболее эффективного решения. Использование данных методов обеспечил комплексный подход к разработке и совершенствованию системы пассивного отвода тепла с двухфазным кольцевым термосифоном. **Результат.** Разработана компьютерная модель совершенствования системы пассивного отвода тепла от бассейна выдержки с двухфазным кольцевым термосифоном. Эта модель позволяет проводить анализ работы системы, усовершенствовать ее параметры и улучшить эффективность отвода тепла. Создание такой модели является важным шагом в развитии и совершенствовании системы, позволяя более точно прогнозировать ее работу и вносить необходимые улучшения. **Вывод.** Разработанная компьютерная модель может быть использована для дальнейших исследований, совершенствования процессов отвода тепла и повышения эффективности работы системы в целом. Она позволяет более детально изучить процессы отвода тепла и настроить работу системы. Модель предоставляет возможность проводить численные расчеты, анализировать различные сценарии и оценивать эффективность изменений параметров системы.

Компьютерная модель; система пассивного отвода тепла; система охлаждения топливного бассейна.

V.V. Dyadichev, S.G. Menyuk, D.S. Menyuk

DEVELOPMENT OF A COMPUTER MODEL FOR IMPROVING THE SYSTEM OF PASSIVE HEAT REMOVAL FROM THE HOLDING POOL WITH A TWO-PHASE RING THERMOSIPHON

*The purpose of this study is to create a computer model that will be used to improve the passive heat removal system from the holding pool with a two-phase annular thermosiphon. This model will allow you to analyze the operation of the system, determine a set of quasi-optimal solutions for its parameters and improve the efficiency of heat removal. The development of such a model can help improve heat transfer processes and improve the efficiency of the system as a whole. **Method.** To solve this problem, mathematical and computer modeling methods were used, the mechanisms of heat transfer in the system were studied and optimal parameters for effective heat removal were determined, as well as various design options and system parameters were compared to select the most effective solution. The use of these methods provided an integrated approach to the development and improvement of a passive heat removal system with a two-phase ring thermosiphon. **Result.** A computer model has been developed to improve the system of passive heat removal from the holding pool with a two-phase annular thermosiphon. This model allows you to analyze the operation of the system, improve its parameters and improve the efficiency of heat removal. Creating such a model is an important step in the development and improvement of the system, allowing you to more accurately predict its performance and make the necessary improvements. **Conclusion.** The developed computer model can be used for further research, improvement of heat removal processes and increase the efficiency of the system as a whole. It allows you to study the heat removal processes in more detail and adjust the operation of the system. The model provides an opportunity to perform numerical calculations, analyze various scenarios and evaluate the effectiveness of changes in system parameters.*

Simulation computer model; passive heat removal system; fuel pool cooling system.

Введение. После выгорания ядерного топлива в активной зоне реактора, его нужно переместить в специальные бассейны хранения, где оно будет находиться определенное время для остывания и снижения радиоактивности. Этот процесс называется хранением отработавшего ядерного топлива. В приреакторном бассейне отработавшее топливо находится под водой в течении долгого времени, что позволяет снизить уровень радиоактивности и предотвратить возможные аварийные ситуации. Вода в бассейне также обеспечивает охлаждение топлива, снижая его тепловыделение.

Конструктивные решения компоновки БВиП (бассейнов для выдержки и переработки отработавшего ядерного топлива) соответствуют высоким требованиям ядерной безопасности. В проекте энергоблоков с реакторной установкой В-491 предусмотрены системы для организации теплоотвода от отработавших топливных сборок. Эти системы обеспечивают эффективное охлаждение отработавшего топлива, предотвращая перегрев и минимизируя

риски повреждения оболочки топлива риски возгорания или других аварийных ситуаций. Также в проекте предусмотрены системы, которые дублируют полностью или частично функции систем теплоотвода при возникновении аварийных ситуаций.

Системы активной безопасности, которые требуют вмешательства человека или внешних источников энергии для своего функционирования, могут оказаться недостаточно эффективными в случае крупных аварий, таких как авария на АЭС Фукусима-1.

Авария на 4-м энергоблоке АЭС Фукусима-1 была вызвана рядом серьезных проблем, которые привели к расплавлению отработавшего ядерного топлива в бассейне выдержки и перегрузки. Эта авария показала, что использование только активных систем охлаждения ОЯТ может оказаться недостаточными в экстремальных ситуациях. Одной из основных причин аварии было выкипание воды, охлаждающей отработавшие тепловыделяющие сборки, что привело к оголению отработавших топливных сборок и плавлению топлива. Последующее выделение водорода вследствие пароциркониевой реакции и взрыв способствовали выбросу радиоактивных веществ в окружающую среду [1–3].

Эта авария подчеркнула важность не только обеспечения эффективности систем теплоотвода и безопасности в ядерных энергетических установках, но и необходимость учета возможности каскадных отказов и сценариев аварий при проектировании и эксплуатации ядерных реакторов.

Одним из ключевых элементов обеспечения безопасности в ядерной энергетике являются пассивные системы безопасности. Такие системы представляют собой замкнутый контур естественной циркуляции двухфазного теплоносителя. Их принцип действия основан на использовании физических законов для эффективного отведения теплоты от оборудования или систем, где требуется охлаждение. Система пассивного отвода тепла (СПОТ) на АЭС представляет собой систему, которая использует естественные физические процессы для охлаждения без необходимости в активных механизмах или источниках энергии. Ключевую роль в ее работе играют наклонные теплообменные трубки, обеспечивающие эффективный теплообмен. Наклонное расположение трубок способствует естественной конвекции и эффективному отводу тепла. Теплообменные трубки погружены в бассейн с водой, который служит в качестве теплоприемника. Вода в бассейне охлаждается за счет естественной конвекции и испарения. Вся система размещена в герметичном корпусе, который защищает ее от внешних воздействий и обеспечивает необходимые условия для работы. Для улучшения теплообмена и испарения воды в бассейне предусмотрена система естественной вентиляции, которая обеспечивает циркуляцию воздуха вокруг теплообменных трубок.

Современные энергоблоки атомных электростанций (АЭС) с реакторами ВВЭР-1200 (проект В-491) оснащены системой пассивного отвода тепла, которая состоит из независимых каналов, каждый из которых способен обеспечить эффективное отведение тепла от реактора. Такая многоканальная система повышает надежность работы СПОТ и минимизирует риски при возникновении нестандартных ситуаций. Согласно технической документации, максимальная величина остаточных тепловыделений в реакторе ВВЭР-1200 составляет 19,5 МВт.

В рамках настоящего исследования разработать компьютерную модель, которая будет раскрывать потенциал геометрических параметров теплообменных трубок СПОТ с целью увеличения эффективности отвода тепла и повышения безопасности работы АЭС. Данное исследование посвящено изучению влияния изменения диаметра теплообменных трубок и величины угла их наклона на зависимость отводимой мощности тепловыделений в системе пассивного отвода тепла (СПОТ) для энергоблоков АЭС с реактором ВВЭР-1200.

На энергоблоках с ВВЭР-1200 (В-491) применяются различные системы теплоотвода от бассейна выдержки и перегрузки топлива для обеспечения безопасности и эффективности хранения отработавшего ядерного топлива. Некоторые из основных систем включают:

1. Система охлаждения бассейна выдержки: эта система обеспечивает постоянное охлаждение отработавшего топлива, чтобы предотвратить его перегрев и обеспечить стабильные условия хранения.

2. Система контроля уровня воды: система, которая следит за уровнем воды в бассейне выдержки и поддерживает его на необходимом уровне для эффективного охлаждения отработавшего топлива.

3. Система фильтрации и очистки воды: для обеспечения чистоты и качества воды в бассейне выдержки применяются системы фильтрации и очистки, которые удаляют загрязнения и радиоактивные частицы.

4. Системы аварийного охлаждения: дополнительные системы, которые могут включаться автоматически в случае аварийных ситуаций, чтобы обеспечить дополнительное охлаждение отработавшего топлива.

Эти системы работают в комплексе для обеспечения безопасного и эффективного хранения отработавшего ядерного топлива на энергоблоках с ВВЭР-1200 (В-491). Они играют ключевую роль в обеспечении ядерной безопасности и предотвращении потенциальных аварийных ситуаций.

Система охлаждения топливного бассейна (ФАК) имеет ряд важных функций, которые обеспечивают безопасность и эффективность эксплуатации ядерной установки. Ниже перечислены основные цели и задачи системы охлаждения топливного бассейна. Система ФАК предназначена для эффективного охлаждения отработавших сборок, находящихся в топливном бассейне, во всех режимах эксплуатации, включая аварийные ситуации. Она помогает создать радиационно-защитный слой над топливными сборками в шахте реактора, топливном бассейне и колодце перегрузки, что снижает уровень радиационного воздействия на персонал. Данная система используется для заполнения и опорожнения шахты реактора во время работ по перегрузке топлива и других технологических операций. Система обеспечивает возможность заполнения и опорожнения топливного бассейна и колодца перегрузки при проведении работ по ремонту и обслуживанию. Трубопроводы системы ФАК могут использоваться для подачи воды от спринклерных насосов для заполнения шахты ревизии ВКУ во время проведения работ по перегрузке топлива или послеаварийных мероприятий.

Каждый из двух независимых каналов системы охлаждения топливного бассейна (ФАК) состоит из компонентов, обеспечивающих эффективное охлаждение отработавшего топлива и выполнение других функций системы:

1. Насос ФАК10(40) AP001, который обеспечивает циркуляцию охлаждающей жидкости (обычно воды) в системе, помогая отводить тепло от отработавших кассет.

2. Теплообменник ФАК10(40) AC001, обеспечивает теплообмен между охлаждающей жидкостью из системы и отработавшим топливом, помогая охлаждать его.

3. Заборный и раздающие коллекторы, они обеспечивают распределение охлаждающей жидкости между различными участками системы, включая топливные кассеты.

4. Арматура: клапаны, задвижки и другая арматура, которая регулирует поток охлаждающей жидкости и обеспечивает безопасную эксплуатацию системы.

5. Трубопроводы, которые соединяют все компоненты системы и обеспечивают циркуляцию охлаждающей жидкости по всей системе.

Каждый из этих компонентов играет важную роль в работе системы охлаждения топливного бассейна и обеспечивает выполнение всех функций, необходимых для эффективного охлаждения отработавшего топлива и обеспечения безопасности ядерной установки. Двойное выполнение системы обеспечивает надежность и защиту от отказов в работе [4–7].

Основная часть. На данный момент энергоблоки российского производства, включая энергоблоки с ВВЭР-1200, обладают системами охлаждения топливного бассейна ФАК, которые предназначены для отвода теплоты от отработавших топливных сборок. Однако нарабатанный опыт в области эксплуатации АЭС показал, что необходимо также вносить в новые и существующие проекты энергоблоков системы пассивного отвода тепла в т.ч. и для топливного бассейна. Эти системы спроектированы для обеспечения безопасности и эффективности хранения отработавшего ядерного топлива и предотвращения катастрофических сценариев, подобных аварии на АЭС Фукусима-1.

Однако, несмотря на наличие систем охлаждения топливного бассейна на российских энергоблоках, важно продолжать усовершенствование и совершенствование систем безопасности ядерных установок, чтобы минимизировать риски возникновения серьезных аварийных ситуаций.

Энергоблоки с ВВЭР-1200 имеют свои особенности и уникальные системы безопасности, которые должны обеспечивать безопасность и надежность их эксплуатации. Российские ядерные специалисты и инженеры продолжают работать над совершенствованием систем безопасности и обеспечением надежной и безопасной работы ядерных энергетических установок.

Одним из таких решений являются пассивные системы безопасности. Такая система, представляет собой замкнутый контур естественной циркуляции двухфазного теплоносителя, используется для охлаждения систем или оборудования, где требуется эффективное отведение теплоты. В данной системе присутствуют три основных участка: испарительный, конденсационный и транспортный (рис. 1).

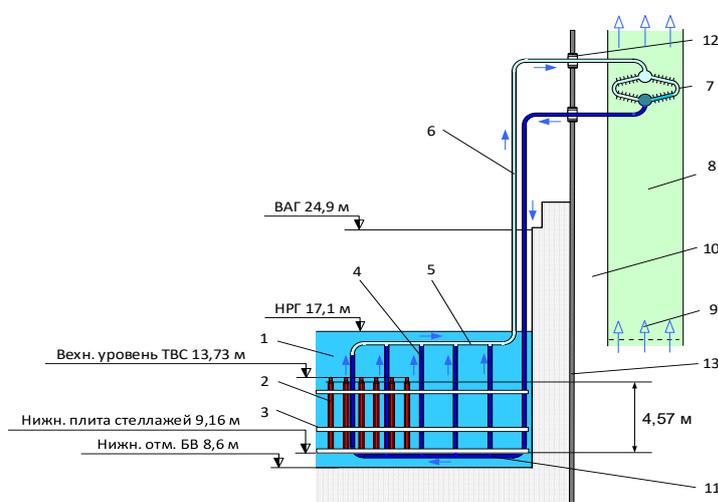


Рис. 1. Схема автономной системы пассивного отвода тепла бассейна выдержки отработавшего ядерного топлива (СПОТ) на основе кольцевого двухфазного термосифона (КДТС): 1 – топливный бассейн, 2 – ТВС, 3 – плита стеллажей, 4 – испаритель наружной поверхности, 5 – коллектор, 6 – трубопровод, 7 – конденсатор, 8 – атмосфера, 9 – поток атмосферного воздуха, 10 – конденсатный трубопровод, 11 – раздающий коллектор, 12 – гермопроходка, 13 – гермооболочки

Системы охлаждения топливного бассейна (ФАК) на энергоблоках имеют ряд важных функций, включая отвод остаточных тепловыделений от отработавших топливных сборок, обеспечение радиационной защиты, заполнение и опорожнение шахт реактора, а также другие технологические операции [8–10].

Для решения поставленной задачи был использован RELAP5, который является одним из распространенных и широко используемых кодов для моделирования ядерных реакторов и систем охлаждения в ядерной энергетике [11–13].

Описание модели. Нодализационная схема модели СПОТ включает в себя основные элементы системы и оборудования, которые важны для моделирования и анализа процессов в тепловой электростанции. Она позволяет операторам и инженерам ясно представлять структуру системы, а также проводить анализ и моделирование различных сценариев работы и аварийных ситуаций (рис. 2).

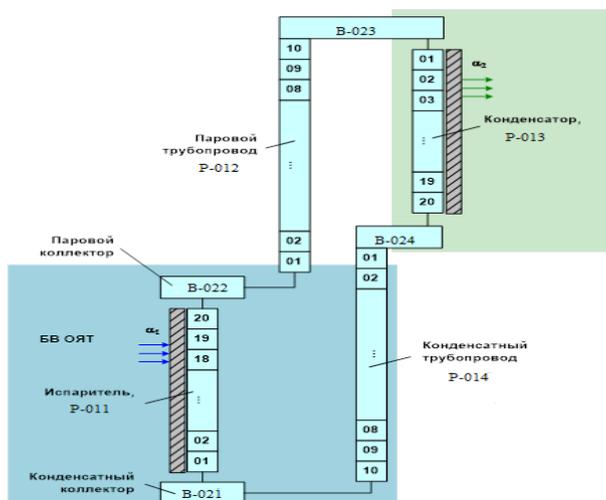


Рис. 2. Нодализация схема контура системы пассивного отвода тепла бассейна выдержки отработавшего ядерного топлива

Испаритель представлен гидродинамическим элементом типа *pipe*. На рисунке испарительному участку соответствуют участки *pipe-11* с номерами от 01 до 20. Разбиение испарителя по высоте было необходимо для учета изменения паросодержания и скоростей фаз по длине (высоте) испарительных каналов. Предварительные расчеты продемонстрировали, что минимально необходимое количество элементарных расчетных объемов составляет ~15..20. Дальнейшая детализация не оказывает влияния на получаемые результаты, но приводит к увеличению расчетного времени.

Длина каждого расчетного участка принята равной 0,22 м. Таким образом, полная длина каждой испарительной трубки составляет 4,40 м. Это позволяет разместить испаритель с коллекторами по высоте между нижней и верхней плитами стеллажей хранения ОЯТ в БВ.

Проходное сечение *i*-го участка, в случае трубчатого испарителя, вычисляется по формуле:

$$S_i = k \cdot N \cdot \pi \cdot \frac{d_i^2}{4}, \quad (1)$$

где $d_i = d$ – внутренний диаметр одной трубки.

Гидравлический диаметр каждого участка, в случае трубчатого испарителя, равен геометрическому внутреннему диаметру одной трубки d и, при использовании трубного пучка $16 \times 1,5$, составляет 0,013 м. В случае канала некруглого сечения, эквивалентный гидравлический диаметр элементарного расчетного объема вычисляется по формуле:

$$D_{Hi} = 4 \cdot \frac{V_i}{S_{wi}}, \quad (2)$$

где V_i – объем *i*-го расчетного элемента,

S_{wi} – площадь смоченной боковой поверхности *i*-го расчетного элемента.

Наклон теплообменных трубок задается величиной угла α (в отдельности для каждого участка). Поскольку преобладающее течение предполагается восходящим, вертикальному расположению соответствует значение $\alpha = +90^\circ$.

Площади связей между участками по умолчанию принимаются равными минимальной из площадей проходных сечений смежных участков.

Контур представлен гидродинамическим элементом типа *pipe* и *branch*. На рисунке собственно паропроводу соответствуют участки *pipe-12*.

Варьируя длины и углы наклона участков *pipe-12*, можно изменять длину паропровода и разность высотных отметок между испарителем и конденсатором в соответствии с формулой:

$$\Delta H = \sum_{i=1}^N L_i \cdot \sin(\alpha_i), \quad (3)$$

где L_i – длина i -го участка,

α_i – угол наклона i -го участка в градусах,

N – количество трубок испарителя (испарительных каналов).

Элемент *branch* с номером 22 соответствует сборному (выходному) паровому коллектору испарителя, элемент *branch* с номером 23 – раздающему (входному) паровому коллектору конденсатора.

Конденсатор представлен гидродинамическим элементом типа *pipe*. На рисунке испарительному участку соответствуют участки *pipe-13*.

Оптимальное количество элементарных расчетных объемов было выбрано из тех же соображений, что и для испарителя. В окончательном варианте модели число элементарных расчетных объемов принято равным 20.

Длина каждого расчетного участка принята равной 0,22 .. 2,2 м. Таким образом, полная эффективная длина каждой трубки конденсатора составляет 4,40 ... 44,0 м.

Проходное сечение i -го участка, в случае трубчатого конденсатора, вычисляется по формуле:

$$S_i = k \cdot N \cdot \pi \cdot \frac{d_i^2}{4}, \quad (4)$$

где $d_i = d$ – внутренний диаметр одной трубки,

N – количество трубок испарителя (испарительных каналов),

k – количество трубок конденсатора (конденсационных каналов), приходящихся на одну трубку испарителя (один испарительный канал). Таким образом, геометрические характеристики испарителя и конденсатора, вообще говоря, могут быть различны [14–16].

Гидравлический диаметр каждого участка рассчитывался по тем же формулам, что и для элементарных расчетных объемов испарителя.

Наклон теплообменных трубок задается величиной угла α (в отдельности для каждого участка). Поскольку преобладающее течение предполагается нисходящим, вертикальному расположению соответствует значение $\alpha = -90^\circ$.

Площади связей между участками по умолчанию принимаются равными площадям проходных сечений смежных участков.

Модель конденсатного трубопровода представлена элементами гидродинамическим элементом типа *pipe* (номер 14) и *branch* (с номерами 24 и 21). Она аналогична модели паропровода. Отличие заключается в величинах проходных сечений и гидравлических диаметров расчетных участков. Длины и разницы высотных отметок соответствующих расчетных участков рассчитывались так же, как и в модели паропровода. При задании высотных отметок, было обеспечено замыкание циркуляционного контура по высоте.

Элемент *branch* с номером 24 соответствует сборному (выходному) коллектору конденсатора, элемент *branch* с номером 21 – раздающему (входному) коллектору испарителя.

Теплообменные поверхности испарителя и конденсатора представлены тепловыми структурами (*heat structures*), схематически показанными на рисунке. Для удобства, номера тепловых структур выбраны такими же, как и номера соответствующих гидродинамических элементов.

Для удобства обработки результатов, в модель были введены диагностические переменные, позволяющие непосредственно вычислить «интегральные» параметры СПОТ и её элементов. В соответствии с синтаксисом программы, диагностическая переменная может быть обозначена мнемоническим символом CV (*Control Variable*) и идентифицируется уникальным трех- или четырехзначным номером (по выбору разработчика модели). При разработке модели использовалась 4-значная нумерация.

В частности, установившееся (эффективное) заполнение испарителя определялось как

$$CV0011 = \frac{1}{N_L} \cdot \sum_{i=1}^N L_i \cdot voidf_012i0000, \quad (5)$$

где $voidf_012i0000$ – относительное объемное содержание воды (жидкой фазы) в i -м расчетном объеме элемента *pipe-12*, N – количество расчетных объемов, из которых состоит *pipe-12* (на Рис. .2 $N=20$),

$$L = \sum_{i=1}^N L_i, \quad (6)$$

где L_i – длина i -го расчетного объема,

$$CV0016 = \frac{1}{NL} \cdot \sum_{i=1}^N L_i \cdot voidf_012i0000 \quad (7)$$

и так далее.

В случае параллельных каналов, можно ввести также средневзвешенное заполнение, определяемое как среднее заполнение индивидуальных каналов. В этом случае весовые коэффициенты пропорциональны площадям проходных сечений (или объемам) элементарных ячеек, а сумма всех весовых коэффициентов для параллельных каналов нормируется на единицу. Данный параметр полезен при расчете системы с пластинчатым испарителем, в котором сечения периферийных и центрального каналов различны [17–19].

Мощность, отводимая СПОТ в стационарном режиме, может быть определена по формуле

$$CV0021 = A \cdot \sum_{i=1}^N q_{_0120i0000}, \quad (8)$$

где $q_{_0120i0000}$ – тепловая мощность (Вт), подводимая от тепловых структур к i -му расчетному объему ГЭ с номером 012, в данном случае *pipe-11*.

$A=1 \cdot 10^{-6}$ введен в формулу для того, чтобы суммарное значение мощности, при выводе в выходной файл, автоматически пересчитывалось в МВт.

Для того, чтобы режим работы СПОТ был полностью определен, необходимо либо дополнить модель БВ с ОЯТ со стороны теплообменника-испарителя, а также моделью атмосферы со стороны теплообменника-конденсатора, либо задать граничные условия на внешних поверхностях теплообменника-испарителя и теплообменника-конденсатора. Первый путь приемлем при проработке окончательного проекта системы. В то же время, при расчете характеристик СПОТ затраты вычислительных ресурсов оказываются неприемлемо большими, особенно учитывая необходимость выполнения значительного количества вариантных расчетов. Поэтому был реализован второй вариант.

Во всех случаях, начальные расходы сред внутри контура полагались равными нулю, контур был частично заполнен водой (из условия начального заполнения испарителя ~40 %), частично – водяным паром. Начальная температура пароводяной смеси в контуре принималась равной +100 °С, что диктовалось исключительно соображениями устойчивости расчетной схемы, реализованной в программе RELAP5. Затем система, находясь автономном состоянии, после чего приходила к стационарному состоянию в соответствии с заданными граничными условиями.

В начальный период времени также включался «искусственный регулятор», позволявший корректировать заполнение контура теплоносителем. Работа регулятора основана на том, что в один из элементарных объемов конденсатного трубопровода (для определенности в *branch-21*) подавался или отбирался теплоноситель. Параметры подаваемого теплоносителя были в точности равны параметрам смеси в элементе *branch-21*, а расход ограничивался величиной, не превышающей по абсолютной величине 5% от расхода естественной циркуляции в контуре.

После достижения заданной массы (внутренняя переменная *sysms-1*), искусственный регулятор отключался. В дальнейшем расчет продолжался до достижения стационарного режима работы системы, то есть до полной стабилизации параметров теплопереноса (не считая короткопериодических флуктуаций, характерных для работы двухфазных термосифонных контуров).

После достижения стационарного режима, определялись степени заполнения расчетных элементов, параметры сред в них, передаваемая мощность, коэффициенты теплоотдачи от внутренних поверхностей теплообменных каналов к теплоносителю термосифонного контура и др. Выполнив серию расчетов для ряда фиксированных заполнений контура (по массе), устанавливалась связь между интересующими нас параметрами, например разностью температур греющей и охлаждающей внешних сред, степенью заполнения испарителя и передаваемой мощностью [20–21].

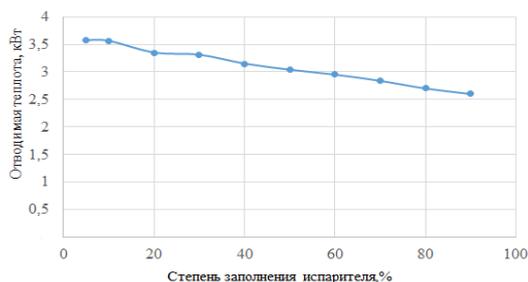


Рис. 3. Отводимая теплота вертикальной трубчаткой Ду 20

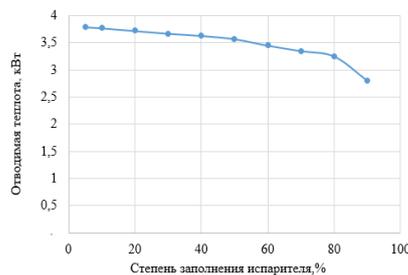


Рис. 4. Отводимая теплота трубчаткой Ду 20 с углом наклона 6

В начале был рассмотрен КДТС в контуре которого и испаритель и конденсатор собраны на основе теплообменных трубок $25 \times 2,5$ мм (Ду20). Высота испарителя и конденсатора принималась одинаковой, при этом для определенности конденсатор был расположен на 5 м выше чем испаритель. В качестве независимого параметра принималась относительная степень заполнения испарительного участка, степень заполнения варьировалась от 5 до 90%. Теплоносителем в контуре КДТС является вода.

На графике (рис. 3) приведена отводимая мощность из расчета на 1 трубку испарительной секции, видно, что оптимальное заполнение находится от 5 до 30% процентов. В этом диапазоне КДТС обладает низкой чувствительностью к заполнению т.е. изменение отводимой мощности не превышает 5%. При этом объемная фракция конденсата в конденсаторе КДТС не превышает 3,5%, а время прохода жидкой и паровой фазы в конденсаторе составляет 0,75 и 9,45 м/с, соответственно.

С целью увеличения времени прохождения теплоносителя через конденсатор на эффективность работы контура КДТС вертикальные трубки КДТС были заменены на наклонные с углом наклона 10 градусов, благодаря этому длина конденсатного участка увеличилась в 10 раз (с 4.4 м до 44 м) при неизменных высотных отметках контура. Результаты для данного расчета приведены на рис. 4.

Несмотря на увеличившееся время прохождения смеси через конденсатор величина отводимой мощности практически не изменилась.

Как вариант, был рассмотрен контур, в котором испарительная секция была собрана из трубчаткой $16 \times 1,5$ мм (Ду13). Остальные параметры системы не изменялись. Результаты расчетов передаваемой мощности как функции заполнения представлены на рис. 5 (конденсатор с вертикальной трубчаткой) и рис. 6 (конденсатор с наклонной трубчаткой).

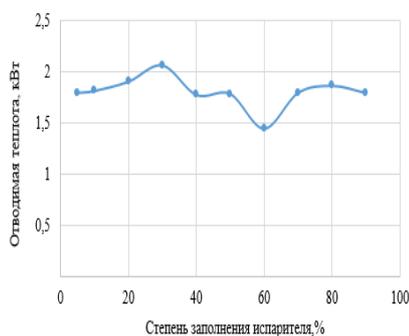


Рис. 5. Отводимая теплота вертикальной трубчаткой Ду 13

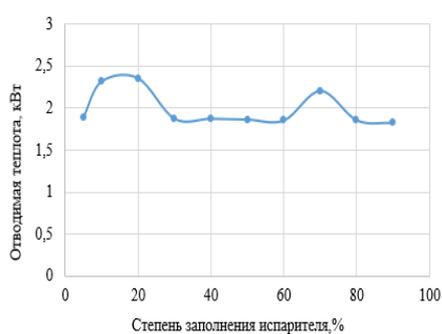


Рис. 6. Отводимая теплота трубчаткой Ду 13 с углом наклона 6

Отводимая мощность из расчета на одну трубку при оптимальном заполнении изменилась с 1,8 кВт на 2,4 кВт зависимость отводимой мощности от заполнения приняла немонотонный характер. Первый оптимум приходится на заполнение 5-40%. В то же

время, если принять шаг трубочки $1,35d_{\text{вн}}$, то плотность трубного пучка, собранная из трубок Ду 13 мм, в 2,4441 раза больше, нежели из трубок Ду 20 мм, соответственно, во столько же раз изменится величина отводимой мощности при тех же габаритных размерах испарительной секции.

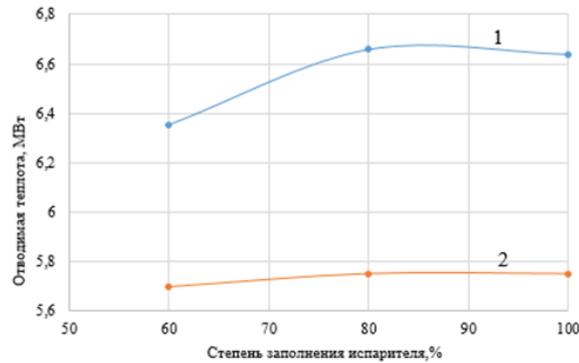


Рис. 7. Отводимая теплота одной петлей СПОТ: 1 – с трубочкой Ду 13 мм; кривая 2 – с трубочкой Ду 20 мм

Созданная имитационная компьютерная модель предназначена для анализа и оптимизации работы системы пассивного отвода тепла с использованием двухфазного кольцевого термосифона. При достижении в бассейне охладителя и, соответственно, в герметичном испарительном теплообменнике заданной для теплоотвода температуры, в верхней части теплообменника скапливаются пары жидкости, которые создают избыточное давление и выталкивают рабочую жидкость через обратный паровой трубопровод пароводяной смеси во внешний герметичный конденсаторный теплообменник, размещен на куполе энергоблока в специальном помещении, где имеет неограниченный запас среды для сброса теплоты. Рабочая среда, проходя через пространство приреакторного бассейна, нагреваясь отбирает тепло у воды топливного бассейна, испаряется, пар рабочей среды поднимается по подъемном трубопроводам, конденсируется в конденсаторе предлагаемой среды, а затем конденсат поступает обратно в опускной участок системы к бассейну.

Отвод тепла производится путем охлаждения воздухом корпуса теплообменника непосредственно и через его ребра. Модель позволяет определить наиболее подходящее заполнение системы и диапазон КДТС, при котором система обладает низкой чувствительностью к изменениям охлаждаемой среды. Это позволяет улучшить эффективность отвода тепла и повысить производительность системы. Модель может быть использована для проведения различных тестов и исследований, а также для обоснования технических решений по совершенствованию системы отвода тепла.

Выводы. В целях повышения эффективности и безопасности работы АЭС разработана компьютерная модель, определяющая набор квазиоптимальных решений для геометрических параметров теплообменных трубок системы пассивного отвода тепла от бассейна выдержки с использованием двухфазного кольцевого термосифона. Модель позволяет проводить детальный анализ работы системы, выявляя ее сильные и слабые стороны, а также проводить улучшение ключевых параметров для достижения максимальной эффективности отвода тепла.

В ходе проведенных исследований было установлено, что использование трубок Ду 13 мм вместо Ду 20 привело к увеличению отводимой мощности на одну трубку с 1,8 кВт до 2,4 кВт. Каждый канал системы способен отвести порядка 7 МВт тепловой энергии. Это означает, что вся система отводит 21 МВт, что превышает установленные нормативы величины остаточных тепловыделений на 7,6%.

Таким образом предлагаемая система пассивного отвода теплоты при заполнении 85 %, и использовании в качестве конструктивного элемента трубочки с внутренним диаметром 13 мм, заполненная водой, гарантированно справляется с остаточными тепловыделениями, когда в топливный бассейн аварийно выгружается вся активная зона, но

она не способна обеспечить требуемые параметры среды при работе в условиях нормальной эксплуатации. Для того, чтобы внедрить ее в эксплуатацию при нормальных условиях необходимо провести исследования, используя предлагаемую модель, где в качестве теплоносителя выступить вещество с пониженной температурой кипения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Букринский А.М. Безопасность атомных станций по федеральным нормам и правилам России и стандартам МАГАТЭ. Сравнение основных принципов и требований по обеспечению безопасности. – 3-е изд. М.: НТЦ ЯРБ, 2019. – 196 с.
2. Дмитриев С.М. [и др.]. Исследование локальной гидродинамики теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2020. – Т. 63, № 2. – С. 151-162. – <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-151-162>.
3. Сорокин В.В. Расчет времени пуска пассивного каталитического рекомбинатора водорода локализуемой системы безопасности АЭС с ВВЭР // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – Т. 65, №. 1. – С. 67-75.
4. Морозов А.В. [и др.]. Пути совершенствования системы пассивного охлаждения активной зоны реактора ВВЭР // Матер. XIV Международной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса», Саратов, 30 октября - 1 ноября 2018. – Саратов, 2018. – С. 115-120.
5. Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants. IAEA-TECDOC-1624. Vienna: IAEA, 2009. Mode of access: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1624_web.pdf (Date of access: 07.01.2022).
6. Natural circulation in water cooled nuclear power plants: Phenomena, models, and methodology for system reliability assessments. IAEA-TECDOC-1474. Vienna: IAEA, 2005. Mode of access: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1474_web.pdf (Date of access: 05.01.2022).
7. Sierchula J. Analysis of passive residual heat removal system in AP1000 nuclear power plant // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 214. Art. ID 012095. – <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012095>.
8. Li Feng [et al.]. Design, Experiment, and Commissioning of the Passive Residual Heat Removal System of China's Generation III Nuclear Power HPR1000 // Science and Technology of Nuclear Installations. – 2021. – 6 p. – <https://doi.org/10.1155/2021/6680400>.
9. Дан П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы: пер. с англ. Ю.А. Зейгарник. – М.: Энергия, 1979. – 272 с.
10. и С. Тепловые трубы: Теория и практика: пер. с англ. В.Я. Сидоров. – М.: Машиностроение, 1981. – 207 с.
11. Vijayan P.K., Nayak A.K., Kumar N. Chapter 1 - Natural circulation loops - advantages, challenges, and classification // Single-Phase, Two-Phase and Supercritical Natural Circulation Systems. – Woodhead Publishing, 2019. – P. 1-30. – <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102486-7.00001-9>.
12. Sviridenko I.I. [et al.]. Passive Residual Heat Removal System for WWER with the Thermosiphon Heatexchange Equipment // International Journal of Energy for a Clean Environment. – 2015. – Vol. 16, No. 1-4. – P. 209-223. – <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2015015683>.
13. Свириденко И.И., Шевелев Д.В., Свердлов В.В. Расчетные исследования аварийного теплоотвода ВВЭР автономной термосифонной СПОТ первого контура // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: Науч.-тех. сб. – Сосновый Бор: ФГУП НИТИ, 2018. – Вып. 3 (13). – С. 28-41.
14. Свириденко И.И. Удержание реактора в подкритическом состоянии при запроектной аварии одно-временным расхолаживанием и декомпрессией первого контура // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2019. – № 1. – С. 85-96. – <https://doi.org/10.26583/npe.2019.1.08>.
15. Инструкция по ликвидации аварий и аварийных ситуаций на реакторной установке энергоблока № 5 Запорожской АЭС. 05.ГТ.00.ИЭ.11. ОП «Запорожская АЭС», 2017. – 444 с.
16. Васильев, Л.Л. Теплообменники на тепловых трубах. – Минск: Наука и техника, 1981. – 143 с.
17. Безродный М.К., Пиоро И.Л., Костюк Т.О., Факт К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика. – 2005. – 704 с.
18. АЭС «Куданкулам». Классификация систем, оборудования, трубопроводов и элементов тепло-технической части. КК.UJA.0.SR.PZ.PR004. Институт «Атомэнергопроект», 2002.
19. Благовещенский А.Я. [и др.]. Концепция расширенного использования естественной циркуляции теплоносителя первого контура в энергоблоках с ВВЭР-1000 (1200) и перспективы ее реализации // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: Матер. 8-й Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 23-25 мая 2012 г. – М.: Концерн «Росэнергоатом», 2012. – С. 602-605.

20. Букин Н.В. [и др.]. Влияние пассивных систем на протекание типичных запроектных аварий РУ В-392 // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Матер. 2-й науч.-техн. конф., Подольск, 19-23 ноября 2001 г. – Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2001/report1/vrsnptza.pdf> (дата доступа: 17.09.2021).
21. Андрущечко С.А. [и др.]. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. – М.: Логос, 2010. – 603 с.

REFERENCES

1. Bukrinskiy A.M. Bezopasnost' atomnykh stanciy po federal'nym normam i pravilam Rossii i standartam MAGATE. Sravnenie osnovnykh principov i trebovaniy po obespecheniyu bezopasnosti [Safety of nuclear power plants according to federal norms and rules of Russia and IAEA standards. Comparison of the basic principles and requirements for safety]. 3rd ed. Moscow: NTC YaRB, 2019, 196 p.
2. Dmitriev S.M. [i dr.]. Issledovanie lokal'noy gidrodinamiki teplonositelya v smeshannoy aktivnoy zone reaktora VVER [Investigation of the local hydrodynamics of the coolant in the mixed core of the VVER reactor], *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG* [Energy. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS], 2020, Vol. 63, No. 2, pp. 151-162. Available at: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-151-162>.
3. Sorokin V.V. Raschet vremeni puska passivnogo kataliticheskogo rekombinatora vodoroda lokalizuyushchey sistemy bezopasnosti AES s VVER [Calculation of the start-up time of the passive catalytic hydrogen recombinator of the localized safety system of nuclear power plants with VVER], *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG* [Energy. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS], 2022, Vol. 65, No. 1, pp. 67-75.
4. Morozov A.V. [i dr.]. Puti sovershenstvovaniya sistemy passivnogo okhlazhdeniya aktivnoy zony reaktora VVER [Ways to improve the passive cooling system of the VVER reactor core], *Mater. XIV Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferencii «Problemy sovershenstvovaniya toplivno-energeticheskogo kompleksa», Saratov, 30 oktyabrya - 1 noyabrya 2018* [Proceedings of the XIV International Scientific and Technical Conference "Problems of improving the fuel and energy complex", Saratov, October 30 - November 1, 2018]. Saratov, 2018, pp. 115-120.
5. Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants. IAEA-TECDOC-1624. Vienna: IAEA, 2009. Mode of access: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1624_web.pdf (Date of access: 07.01.2022).
6. Natural circulation in water cooled nuclear power plants: Phenomena, models, and methodology for system reliability assessments. IAEA-TECDOC-1474. Vienna: IAEA, 2005. Mode of access: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1474_web.pdf (Date of access: 05.01.2022).
7. Sierchula J. Analysis of passive residual heat removal system in AP1000 nuclear power plant, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, Vol. 214. Art. ID 012095. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012095>.
8. Li Feng [et al.]. Design, Experiment, and Commissioning of the Passive Residual Heat Removal System of China's Generation III Nuclear Power HPR1000, *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2021, 6 p. Available at: <https://doi.org/10.1155/2021/6680400>.
9. Dan P.D., Rey D.A. Teplovye trubyy [Heat pipes], transl. from Engl. by. Yu.A. Zeygarnik. Moscow: Energiya, 1979, 272 p.
10. Chi S. Teplovye trubyy: Teoriya i praktika [Heat pipes: Theory and practice]: transl. from Engl. by. V.Ya. Sidorov. Moscow: Mashinostroyeniye, 1981, 207 p.
11. Vijayan P.K., Nayak A.K., Kumar N. Chapter 1 - Natural circulation loops - advantages, challenges, and classification, *Single-Phase, Two-Phase and Supercritical Natural Circulation Systems*. Woodhead Publishing, 2019, pp. 1-30. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102486-7.00001-9>.
12. Sviridenko I.I. [et al.]. Passive Residual Heat Removal System for WWER with the Thermosiphon Heatexchange Equipment, *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2015, Vol. 16, No. 1-4, pp. 209-223. Available at: <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2015015683>.
13. Sviridenko I.I., Shevelev D.V., Sverdlov V.V. Raschetnye issledovaniya avariynogo teplootvoda VVER avtonomnoy termosifonnoy SPOT pervogo kontura [Computational studies of the emergency heat sink of the VVER autonomous thermosiphon SPOT of the first circuit], *Tekhnologii obespecheniya zhiznennogo tsikla yadernykh energeticheskikh ustanovok: Nauch.-tekh. sb.* [Technologies for ensuring the life cycle of nuclear power plants: scientific and technical collection]. Sosnovyy Bor: FGUP NITI, 2018, Issue 3 (13), pp. 28-41.

14. *Sviridenko I.I.* Uderzhanie reaktora v podkriticheskom sostoyanii pri zaproektnoy avarii odnovremennym raskholazhivaniem i dekompressiey pervogo kontura [Keeping the reactor in a subcritical state in case of an out-of-design accident by simultaneous cooling and decompression of the primary circuit], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika* [News of higher educational institutions. Nuclear energy], 2019, No. 1, pp. 85-96. Available at: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.1.08>.
15. Instruktsiya po likvidatsii avariy i avariynykh situatsiy na reaktornoy ustanovke energobloka № 5 Zaporozhskoy AES. 05.GT.00.IE.11. OP «Zaporozhskaya AES», 2017 [Instructions for the elimination of accidents and emergencies at the reactor unit of power unit No. 5 of the Zaporizhia NPP. 05.GT.00.IE.11. OP "Zaporizhia NPP", 2017], 444 p.
16. *Vasil'ev, L.L.* Teploobmenniki na teplovykh trubakh [Heat exchangers on heat pipes]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1981, 143 p.
17. *Bezrodnuy M.K., Pioro I.L., Kostyuk T.O., Fakt K.* Protsessy perenosa v dvukhfaznykh termosifonnykh sistemakh. Teoriya i praktika [Transfer processes in two-phase thermosiphon systems. Theory and practice], 2005, 704 p.
18. AES «Kudankulam». Klassifikatsiya sistem, oborudovaniya, truboprovodov i elementov teplo-tekhnicheskoy chasti. KK.UJA.0.SR.PZ.PR004. Institut «Atomenergoproekt», 2002 [Kudankulam NPP. Classification of systems, equipment, pipelines and elements of the thermal engineering part. KK.UJA.0.SR.PZ.PR004. Atomenergoproekt Institute, 2002].
19. *Blagoveshchenskiy A.Ya.* [i dr.]. Kontseptsiya rasshirennogo ispol'zovaniya estestvennoy tsirkulyatsii teplositelya pervogo kontura v energoblokakh s VVER-1000 (1200) i perspektivy ee realizatsii [The concept of expanded use of natural circulation of the primary coolant in power units with VVER-1000 (1200) and prospects for its implementation], *Bezopasnost', effektivnost' i ekonomika atomnoy energetiki: Mater. 8-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Moskva, 23-25 maya 2012 g.* [Safety, efficiency and economics of nuclear energy: Materials of the 8th International Scientific and Technical Conference. Conf., Moscow, May 23-25, 2012]. Moscow: Kontsern «Rosenergoatom», 2012, pp. 602-605.
20. *Bukin N.V.* [i dr.]. Vliyaniye passivnykh sistem na protekanie tipichnykh zaproektnykh avariyy RU V-392 [The influence of passive systems on the course of typical out-of-design accidents of RU V-392], *Obespecheniye bezopasnosti AES s VVER: Mater. 2-y nauch.-tekhn. konf., Podol'sk, 19-23 noyabrya 2001 g.* [Ensuring the safety of nuclear power plants with VVER: materials of the 2nd scientific and technical Conference, Podolsk, November 19-23, 2001]. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2001/report1/vpsnptza.pdf> (accessed 17 September 2021).
21. *Andrushechko S.A.* [i dr.]. AES s reaktorom tipa VVER-1000. Ot fizicheskikh osnov ekspluatatsii do evolyutsii proekta [Nuclear power plant with a VVER-1000 reactor. From the physical foundations of operation to the evolution of the project]. Moscow: Logos, 2010, 603 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.А. Кравченко.

Дядичев Валерий Владиславович – Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского; e-mail: mr.dyadichev@mail.ru; г. Симферополь, Россия; кафедра компьютерной инженерии и моделирования; д.т.н.; профессор.

Менюк Сергей Григорьевич – e-mail: menuka@mail.ru; кафедра компьютерной инженерии и моделирования; к.э.н.; доцент.

Менюк Дмитрий Сергеевич – Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций; e-mail: d.menuuk@mail.ru; г. Москва, Россия; инженер.

Dyadichev Valery Vladislavovich – V.I. Vernadsky KFU; e-mail: mr.dyadichev@mail.ru; Simferopol, Russia; the Department of Computer Engineering and Modeling; dr. of eng. sc.; professor.

Menyuk Sergey Grigor'evich – e-mail: menuka@mail.ru; the Department of Computer Engineering and Modeling; cand. of econom. sc.; associate professor.

Menyuk Dmitry Sergeevich – All-Russian Research Institute for the Operation of Nuclear Power Plants; e-mail: d.menuuk@mail.ru; Moscow, Russia; engineer.

А.В. Козловский, Э.В. Мельник, А.Н. Самойлов

**ПРИМЕНЕНИЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ
ПОПОЛНЕНИЯ БАЗЫ ЗНАНИЙ О МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
В СИСТЕМАХ ПРИКЛАДНОЙ ФОТОГРАММЕТРИИ**

Рассмотрены вопросы, связанные с автоматизацией процедуры синтеза систем прикладной фотограмметрии. Такие системы служат для измерения и учета объектов по изображениям и в настоящее время широко применяются в различных областях деятельности, таких как картографирование, археология и аэрофотосъемка. Широкому применению также способствует повышение доступности и мобильности устройств для получения изображений. Все это обусловило проведение активных исследований, направленных на разработку методического обеспечения для систем прикладной фотограмметрии. Отслеживание в ручном режиме появления новых методов и алгоритмов фотограмметрической обработки информации для широкой номенклатуры областей применения достаточно затруднительно, что делает актуальной автоматизацию данной процедуры. Предлагаемое в статье решение основано на использовании базы знаний о методах обработки информации в системах прикладной фотограмметрии, основными элементами которой являются нечеткая онтология предметной области и база данных, что логично, т.к. информация о предметной области может быть достаточно легко структурирована. В качестве основы для онтологии было взято существующее решение, которое было дополнено на основе результатов анализа текущего состояния предметной области. Полученная онтология далее использована для поиска и классификации методов обработки информации в системах прикладной фотограмметрии и заполнения базы знаний. В связи с активизацией разработки новых методов обработки информации в системах прикладной фотограмметрии возникает необходимость модификации онтологии и пополнения базы данных, т. е. пополнения базы знаний. Важным источником информации для этого является Интернет. Для автоматизации поиска данных о методах обработки информации и пополнения базы знаний целесообразно использовать большие языковые модели, благодаря которым упрощается решение нескольких задач в области обработки естественного языка, которые включают кластеризацию и формирование новых сущностей для классификации. Соответствующий метод описан в статье. Для метода приведены результаты тестирования его работоспособности. В рамках решения задач проведен сравнительный анализ больших языковых моделей, в результате которого была выбрана модель RoBERTa.

Машинное обучение; графы; обработка изображений; алгоритмы классификации; искусственный интеллект; системы поддержки принятия решений; автоматизация процессов; большие языковые модели; онтология.

A.V. Kozlovskiy, E.V. Melnik, A.N. Samoylov

**A LARGE LANGUAGE MODELS APPLICATION IN ORGANIZATION
OF REPLENISHMENT OF THE KNOWLEDGE BASE ON METHODS
OF INFORMATION PROCESSING IN SYSTEMS OF APPLIED
PHOTOGRAMMETRY**

The article deals with the issues related to the automation of the procedure of synthesis of applied photogrammetry systems. Such systems serve to measure and account for objects from images and are now widely utilized in various fields of activity, such as mapping, archaeology and aerial photography. Increasing availability and mobility of imaging devices has also contributed to the widespread application. All this has led to active research aimed at developing methods and algorithms for applied photogrammetry systems. Manual tracking of new methods and algorithms of photogrammetric information processing for a wide range of application areas is quite difficult, which makes the automation of this procedure urgent. The solution proposed in the article is based on the use of a knowledge base of information processing methods in applied photogrammetry systems, the main elements of which are a fuzzy ontology of the subject area and a database, which is logical, since the information about the subject area can be structured quite easily. As a basis for the ontology, an existing solution was taken, which was supplemented based on the results of analyzing the current state of the subject area. The resulting ontology was further used to search and classify information processing methods in applied photogrammetry systems and to populate the knowledge base. Due to the intensification of the development of new methods of

information processing in the systems of applied photogrammetry, there is a need to modify the ontology and to replenish the database, i.e. to replenish the knowledge base. The Internet is an important source of information for this purpose. To automate the search for data on information processing methods and ontology modification, it is reasonable to use large language models. To automate data mining of information processing methods and to populate the knowledge base, it is useful to use large language models that simplify several natural language processing tasks, which include clustering and formation of new entities for classification. The corresponding method is described in the paper. For the method the results of testing its performance are given. As part of problem solving, a comparative analysis of large language models has been carried out, resulting in the RoBERTa model.

Machine learning; graphs; image processing; classification algorithms; artificial intelligence; decision support systems; process automation; large language models; ontology.

Введение. В настоящее время существует множество задач из различных областей, где возможно применение современных средств автоматизации для ускорения и удешевления производственных процессов. Такие средства позволяют заменить специально подготовленный персонал. Одной из важных областей, для которой актуально создание средств автоматизации, является фотограмметрия [1, 2]. Фотограмметрия ориентирована на решение проблем измерения (площадь, объём [3], местоположение [4, 5]) и подсчёта объектов на изображениях. Для этого применяются различные методы обработки графических данных, например оптическая коррекция изображений [6], объединение нескольких кадров в единый снимок, 3D-моделирование различных объектов [7–9]. В связи с актуальностью решения задач прикладной фотограмметрии исследования в данной области характеризуются высокой интенсивностью, что обуславливает достаточно частое появление новых и модифицированных методов, предназначенных для повышения эффективности решения указанных задач. Из-за этого ручное отслеживание обновлений и изменений становится затруднительным. В данном случае автоматизация может быть реализована на основе методов машинного обучения: может быть создано программное обеспечение, периодически выполняющее поиск в открытых источниках новых и модифицированных методов и добавляющее их в собственную базу знаний. Это позволяет сократить время и ресурсы, необходимые для проведения исследований, а также повысить точность и объективность получаемых результатов.

Несмотря на то, что автоматизация процессов является ключевым направлением развития во многих областях, подобные решения не получили широкого распространения зачастую из-за ограниченных возможностей структурирования данных вследствие особенностей предметной области: в отличие от фотограмметрии, такие области как медицина, право и другие, имеют гораздо более сложные и неопределённые факторы, влияющие на выбор того или иного метода.

Отсутствие достаточного количества структурированных данных также является препятствием для автоматизации: для построения эффективной базы знаний требуется большой объём структурированной информации о методах, условиях их применения и результатах. Также следует отметить имевший место до недавнего времени недостаточный уровень развития технологий обработки естественного языка и машинного обучения для автоматического анализа и структурирования информации из различных источников.

Существующие решения и необходимость их модификации. В ходе исследования предметной области были рассмотрены работы, в которых предложены решения, позволяющие реализовать автоматизированное обновление базы знаний о методах решения задач в области прикладной фотограмметрии [13, 14]. В данных работах для описания предметной области предложено использовать нечёткую онтологию, поскольку невозможно обеспечить точное совпадение значений параметров в базе знаний с фактически имеющимися. Данная онтология является частью базы знаний, её структура приведена в [10].

Существующая онтология требует корректировки. Одной из причин является, например, расширение номенклатуры устройств, которые целесообразно применять при решении задач фотограмметрии. Чтобы получать качественные изображения, изначально использовались профессиональные устройства, обладающие соответствующими характе-

ристиками при ограничениях по мобильности и стоимости. В настоящее время стали применяться мобильные устройства, ориентированные, в первую очередь, на получение изображений, пригодных для простого просмотра пользователем, и для достижения требуемого, с точки зрения решения задач фотограмметрии, результата, например, в условиях недостаточной освещенности, при использовании таких устройств требуется постобработка. При этом номенклатура методов обработки изображений достаточно широка (и постоянно дополняется) и в разных случаях используются разные их сочетания. Таким образом, разработанную ранее онтологию следует модифицировать с учетом расширения номенклатуры применяемых устройств и соответствующего методического обеспечения.

Необходимость модификации онтологии также связана с тем, что фотограмметрия имеет гораздо больше применений, чем подразумевает существующая структура данных. Изменения существующей структуры будут носить комплексный характер. Это должно предоставить большую гибкость, которая позволит динамически дополнять базу знаний.

Необходимые изменения. Первой и самой важной модификацией станет добавление класса «Задача». Он будет строго задавать желаемый конечный результат, который должен быть представлен после работы подобранных методов. В данном классе будут подклассы, задающие общие свойства для групп задач. Например, одним из подклассов станут измерительные задачи. Для них будет обязательным указанием того, какую именно величину в данный момент необходимо определить. То есть компоненты класса «Измерение» будут перенесены в подкласс измерительных задач. Однако ряд возможных измерений тоже будет дополнен понятием «Координаты». Оно будет полезно при определении местоположения объекта. Также заранее можно определить такие подклассы для «Задачи», как «3D-моделирование», «Склейка / Повышение чёткости», «Коррекция», «Прогнозирование / Проектирование» и «Калибровка». Под последним элементом имеется в виду ручное занесение всех параметров. Он будет неразрывно связан с методом «Калибровка на ходу». Перечисленные ранее подклассы тоже будут разделяться. «Коррекция» будет делиться на подклассы «Оптическая» и «Цветовая», «Прогнозирование / Проектирование» – на «Природное» и «Урбанистическое», «3D-моделирование» – на «Объект» и «Поверхность / Рельеф».

Помимо этого, методы прикладной фотограмметрии можно разделить на основные и вспомогательные. Так, к основным будут отнесены те, что проводят анализ изображений и дают оценку заданных параметров; к вспомогательным же будут отнесены те, что либо подготавливают само изображение для получения впоследствии более точных результатов, либо формируют их в форме удобной для восприятия человека. Однако необходимо учесть, что основная задача может быть именно в корректировке изображения, поэтому некоторые вспомогательные методы могут выступать и в роли основных.

Также стоит учитывать, что различные методы могут решать одни и те же или схожие задачи. Это свойство можно использовать для неоднозначных и сложных условий съёмки. Например, можно будет применять два и более методов одновременно, или «параллельно», объединяя их результат при помощи алгоритмов фильтрации и коэффициентов доверия. Для учёта этих изменений необходимо будет добавить к вспомогательным методам алгоритмы фильтрации полученных результатов. Помимо таких сочетаний методов возможно будет также и «последовательное» использование. Это будет справедливо как для цепочки «вспомогательный – основной» (или наоборот), так и для «основной – основной». Под понятием «основной» здесь может пониматься и ранее приведённый вариант «параллельного» применения. Стоит отметить, что возможность использовать метод «параллельно» или «последовательно» будет отмечаться непосредственно в онтологии. Таким образом, будет обеспечена возможность выстраивать любые последовательности применения методов для создания уникальных алгоритмов для различных условий, распознанных системой.

Изменения, подобные первым упомянутым, будут также применены к классу «Ситуация». Данный класс будет включать степень освещённости, тип источника света, время суток, погодные условия. Этот перечень атрибутов должен исчерпывающе описывать условия съёмки.

Следующей модификацией будет добавление класса, описывающего настройки фотоаппаратуры. В данный класс войдут такие параметры камеры, как диафрагма, выдержка, баланс белого и светочувствительность. Это необходимо, для того чтобы иметь более подробные сведения для более точного результата, так как такие данные позволят подбирать методы коррекции изображений. Также эта информация поможет изначально задавать настройки так, чтобы минимизировать потребность в самой коррекции. К тому же параметры камеры смогут помочь оценить, возможна ли съёмка в принципе при имеющемся оборудовании.

Последним изменением в структуре онтологии будет дополнение в класс CBR (Case Based Reasoning). Он должен состоять из четырёх элементов: задача, ситуация, параметры аппаратуры и как вывод из них метод или их связка (алгоритм). Онтология, построенная по предложенным принципам, должна обеспечить основу наподобие каркаса или скелета, которую будет легко масштабировать и дополнять.

Структура онтологии с предложенными модификациями изображена на рис. 1. Она точнее описывает связи между классами и позволяет производить более детальную классификацию. Однако для хранения больших объемов данных онтология не подходит. Для этой информации в дополнение необходимо отдельное хранилище, для реализации которого хорошо подойдёт документно-ориентированная база данных, в которой будут храниться текстовые поля с описанием методов и ссылкой на программную реализацию. Более подробно это будет рассмотрено в следующих пунктах.

Выбор языковой модели. Процесс интеграции новых методов фотограмметрии в базу знаний начинается с обработки текстовых описаний, собранных из различных источников. Для этого используются возможности больших языковых моделей (LLM) на этапе токенизации и генерации эмбедингов.

В ходе исследования проведен сравнительный анализ нескольких предобученных LLM [11–13], среди которых:

- ◆ **BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers):** эффективен для анализа контекста слов и построения обобщенных представлений текста [14];
- ◆ **RoBERTa (A Robustly Optimized BERT Pretraining Approach):** улучшенная версия BERT, обученная на большем объеме данных и демонстрирующая более высокую точность в задачах понимания языка [15];
- ◆ **GPT-2/3 (Generative Pre-trained Transformer):** мощная модель, способная генерировать связный и грамматически правильный текст, а также хорошо улавливающая семантические связи между словами.

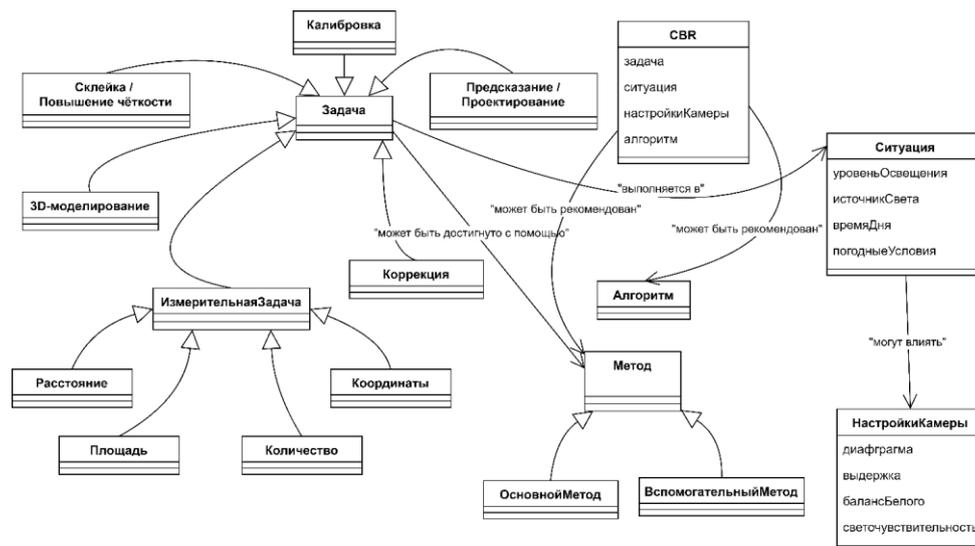


Рис. 1. Модели онтологий

В результате экспериментов с различными LLM и их конфигурациями была выбрана модель RoBERTa, которая показала наилучшие результаты в задачах классификации текстов по тематике фотограмметрии и извлечения ключевой информации о методах [16–18].

Токенизация. Применяется предварительно обученный токенизатор, связанный с моделью RoBERTa. Этот токенизатор разбивает текст на токены, учитывая специфику языка и обучающего набора данных RoBERTa. Важным аспектом является способность токенизатора корректно обрабатывать специфическую терминологию, характерную для области фотограмметрии. Токенизатор RoBERTa продемонстрировал хорошие результаты в распознавании и сохранении целостности таких терминов, как «Structure-from-Motion» (SfM), «Multi-View Stereo» (MVS), «Bundle Adjustment» и др. Токенизатор разбивает текст не только по пробелам, но и сохраняет целостность специфических терминов, представляя их как единый токен.

Для векторизации текста используются предобученные слои модели RoBERTa, которые уже кодируют семантическую информацию о словах и их контексте.

На вход модели RoBERTa подается последовательность токенов, полученная на предыдущем этапе. Модель анализирует эту последовательность, учитывая взаимосвязи между словами, и генерирует для каждого токена вектор фиксированной размерности – «эмбединг». Полученные «эмбединги» отражают не только значение отдельных слов, но и их смысл в контексте всего предложения или даже документа. Это позволяет улавливать более тонкие смысловые особенности в описаниях методов фотограмметрии [19, 20].

После преобразования текстовых описаний методов фотограмметрии в информационно-насыщенные «эмбединги» следующим этапом исследовательской работы стало извлечение ключевых характеристик каждого метода. Для этого использовалась способность LLM понимать естественный язык и отвечать на вопросы.

Разработка промптов является необходимым этапом к корректному извлечению информации, требующим тщательной формулировки запросов, предоставляемых LLM. ходе экспериментов с различными формулировками были найдены наиболее строгие и однозначные, исключающие двойную интерпретацию.

Примеры промптов для определения области применения включают:

- ◆ *«Опишите, для решения каких задач фотограмметрии применяется этот метод.»*
- ◆ *«В каких областях (археология, геодезия, др.) этот метод фотограмметрии нашел применение?»*

Для выявления требований к оборудованию:

- ◆ *«Какое оборудование (тип камеры, датчики, программное обеспечение) необходимо для реализации этого метода?»*
- ◆ *«Существуют ли какие-либо специфические требования к характеристикам оборудования (разрешение камеры, точность датчиков)?»*
- ◆ *Для определения связи с другими методами:*
- ◆ *«Какие методы фотограмметрии часто используются в сочетании с этим методом?»*
- ◆ *«Является ли этот метод модификацией или расширением какого-либо другого метода?»*

Включение дополнительного контекста, такого как название метода или краткое описание его сути, значительно повышает релевантность и точность ответов LLM.

Ответы LLM, хотя и формулируются на естественном языке, требуют дополнительной обработки для извлечения конкретной информации. Для этого используется комбинация методов, включая регулярные выражения для извлечения форматированных данных, таких как названия методов или типов оборудования, и методы NLP для анализа грамматической структуры предложений и выделения ключевых слов и фраз. Извлеченная информация преобразуется в структурированный формат с заполнением заранее определенных слотов в базе знаний.

После извлечения при помощи LLM эмбедингов методов фотограмметрии, наполненных информацией, следующим важным этапом исследования стала кластеризация. Целью кластеризации являлось объединение методов в группы на основе их семантической близости, что позволило выявить скрытые связи и закономерности в наборе данных.

Для измерения смысловой близости между эмбедингами методов был выбран метод косинусного расстояния. Анализ различных метрик сходства показал, что косинусное расстояние лучше всего подходит для задачи определения смысловой близости между описаниями методов. Преимущества косинусного расстояния:

- ◆ игнорирование длины вектора;
- ◆ чувствительность к смысловым связям.
- ◆ Для кластеризации были протестированы несколько алгоритмов:
- ◆ **k-means**: быстрый и простой алгоритм, но требующий задания числа кластеров заранее;
- ◆ **DBSCAN**: автоматически определяет число кластеров и выделяет выбросы, но чувствителен к выбору параметров;
- ◆ **иерархическая кластеризация**: позволяет визуализировать иерархию кластеров, но может быть вычислительно дорогостоящей для больших наборов данных.

В результате экспериментов наилучшие результаты показал алгоритм DBSCAN. Данный алгоритм обеспечил автоматическое определение оптимального числа кластеров, соответствующего интуитивному представлению о структуре предметной области.

Финальный этап исследования заключался в интеграции извлечённой и обработанной информации о методах фотограмметрии непосредственно в базу знаний. Этот процесс позволил представить знания в машиночитаемом формате, что открывает возможности для автоматического поиска, анализа и использования информации.

Первым шагом была генерация RDF triples. В качестве примера были выделены основные разделы для классификации, такие как «Метод», «ОбластьПрименения» и «Оборудование», а также отношения между ними, например, «используетсяДля» и «требует». На основе этого анализа были разработаны шаблоны для генерации RDF triples, каждый из которых соответствовал конкретному отношению в онтологии и определял, какие данные необходимо извлечь из текста и как их преобразовать в формат RDF. Пример шаблона может выглядеть так:

Шаблон: <метод> <область применения> <значение>.

Этот шаблон описывает отношение «область применения» между отдельным методом и конкретной областью, в которой он применяется. Заполнение шаблонов выполнялось с использованием LLM, которые служили интерпретаторами. LLM не только извлекали информацию, но и интерпретировали её в контексте онтологии, анализируя данные и подставляя их в соответствующие слоты шаблонов. Например, LLM могла определить, что метод «Structure-from-Motion» используется для «3D-моделирования зданий» и сформировать соответствующий RDF triple:

Заполненный шаблон: <Structure-from-Motion> <3D-моделирование зданий>.

На следующем этапе интеграции создавались новые сущности для каждого нового метода фотограмметрии, описанного в текстах. Эти сущности добавлялись в онтологию в качестве новых элементов класса «Метод». Сгенерированные RDF triples использовались для установления связей между новыми сущностями и существующими в онтологии классами. Визуализация собранной базы знаний в виде графа представлена на рис. 2.

Возникшие на этом этапе противоречия разрешаются с помощью набора эвристик, например, если в разных источниках для одного и того же метода указывались разные области применения. Эти эвристики основываются на приоритете источников, частоте упоминаний и других факторах, что позволило эффективно устранять конфликты.

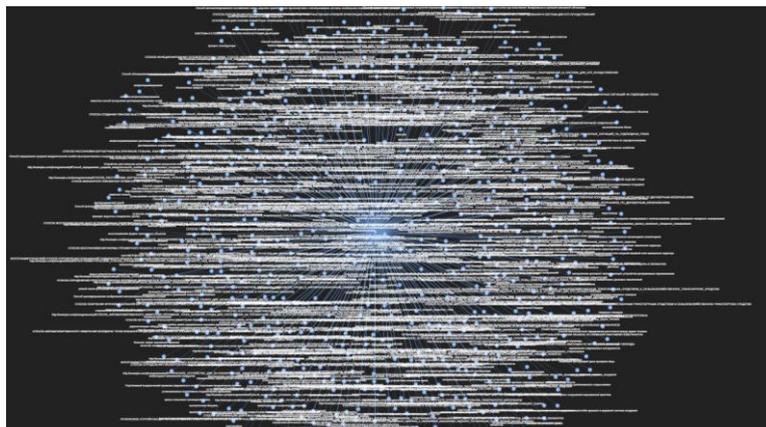


Рис. 2. Общий граф онтологии

Пример конкретного метода фотограмметрии и связанных подклассов представлены на рис. 3.

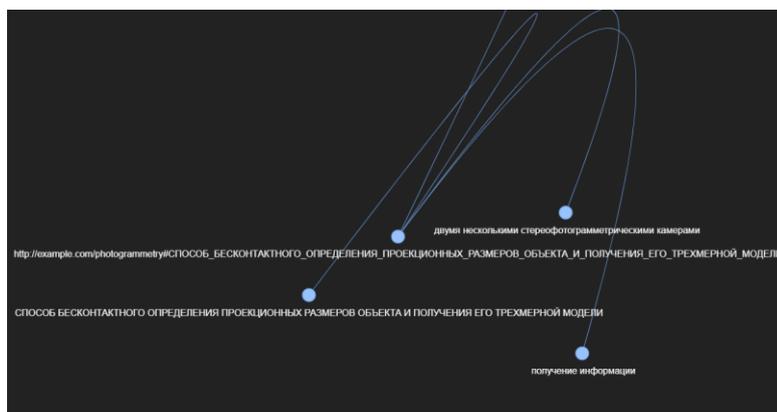


Рис. 3. Пример подграфа для метода фотограмметрии в онтологии

Хранение данных может осуществляться в формате OWL, который является стандартным для представления знаний в Семантическом вебе.

Заключение. Предложенная в данной работе модифицированная онтология для формирования и применения базы знаний для выбора методов решения задач прикладной фотограмметрии учитывает современный уровень развития методической базы и аппаратного обеспечения в области прикладной фотограмметрии. Это позволяет использовать ее в составе базы знаний, используемой при проектировании проблемно-ориентированных систем в данной предметной области.

Для интеграции новых методов в базу знаний предложено использовать большие языковые модели. Это позволяет автоматически базу знаний о современных методах, применяемых в системах прикладной фотограмметрии, что обеспечит возможность определения в ходе проектирования оптимальные сочетаний методов для конкретной задачи фотограмметрии, учитывая особенности каждого конкретного случая.

Полученные результаты могут быть применены при синтезе систем прикладной фотограмметрии для различных областей деятельности, включая картографирование, археологию, аэрофотосъемку и другие.

Благодарности. Исследование проведено в рамках студенческого научного проекта N 4L/22-04-ПИШ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Хабарова И.А., Валиев Д.С., угунов В.А., & Хабаров Д.А.* Современная цифровая фотограмметрия // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». – 2019. – 4(2). – С. 41-47.
2. *Краснопевцев Б.В.* Фотограмметрия. – М.: УПП "Репография" МИИГАиК, 2008. – 160 с.
3. *Алтухов, Виктор Григорьевич.* Исследование точности фотограмметрии как метода определения объема объекта // Автоматика и программная инженерия. – 2020. – 2 (32). – С. 69-74.
4. *Безменов В.М.* Применение методов фотограмметрии в вопросах точности обеспечения пространственного и углового положения снимков дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – 17 (5). – С. 45-52.
5. *Михайлова М.В., Ахмедов А.Н., Шагибалов Р.Р.* Фотограмметрия. Основные принципы и практическое применение // Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы, и системы. Серия «Естественные и технические науки». – 2018. – № 5.
6. *Грушин С.П., Сосновский И.А.* Фотограмметрия в археологии - методика и перспективы // Теория и практика археологических исследований. – 2018. – № 1 (21).
7. *Катермин В.С.:* Фотограмметрия: 3D-модель из фотографий // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2021. – 12-11 (80). – С. 89-94.
8. *уканов А.Н., Цой Е.В., Яковенко А.А., Малый Д.В., Гончаров С.С.* Фотограмметрия в фиксации и анализе локализованной деформации 3d образцов // Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов. – 2023. – С. 168-173.
9. *Ануфриев Владимир Николаевич.* Создание трехмерной модели объектов методами фотограмметрии: аннотация к дипломной работе. – 2022.
10. *Сергеев Н.Е., Самойлов А.Н., Половко И.Ю.* Онтологическое представление фотограмметрических методов для решения задач определения геометрических параметров объектов по предварительно обработанным цифровым изображениям // Вестник АГУ. – 2020. – 3 (266). – С. 34-39.
11. *Бенджио Й., Курвилль А., Венсан П.* Глубокое обучение: пер. с англ. А.А. Слинкина. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 482 с.
12. *Роджерс А., Хастис М.* Обработка естественного языка с помощью TensorFlow: создание приложений для машинного обучения: пер. с англ. А.В. Логунова. – СПб.: Питер, 2019. – 352 с.
13. *Васильев И.Г., Ларионов С.А.* Модели глубокого обучения для обработки естественного языка: учеб. пособие. – Москва: РУДН, 2020. – 119 с.
14. *Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K.* 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. – 2019. – P. 4171-4186.
15. *Liu Y., Ott M., Goyal N., Du J., Joshi M., Chen D., Levy O., Lewis M., Zettlemoyer L., Stoyanov V.* RoBERTa: A Robustly Optimized BERT Pretraining Approach // arXiv preprint arXiv:1907.11692. – 2019.
16. *Radford A., Wu J., Child R., Luan D., Amodei D., Sutskever I.* Language Models are Unsupervised Multitask Learners // OpenAI Blog. – 2019. – Vol. 1, No. 8.
17. *Reimers N., Gurevych I.* Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks // Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and the 9th International Joint Conference on Natural Language Processing (EMNLP-IJCNLP). – 2019. – P. 3980-3990.
18. *Conneau A., Kiela D., Schwenk H., Barrault L., Bordes A.* Supervised Learning of Universal Sentence Representations from Natural Language Inference Data // Proceedings of the 2017 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. – 2017. – P. 670-680.
19. *Pennington J., Socher R., Manning C.D.* GloVe: Global Vectors for Word Representation / J. Pennington // Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP). – 2014. – P. 1532-1543.
20. *Mikolov T., Chen K., Corrado G., Dean J.* Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space // arXiv preprint arXiv:1301.3781. – 2013.

REFERENCES

1. *Khabarova I.A., Valiev D.S., Chugunov V.A., Khabarov D.A.* Sovremennaya tsifrovaya fotogrammetriya [Modern digital photogrammetry], *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh nauk i tekhnologii «Integral»* [International Journal of Applied Science and Technology "Integral"], 2019, No. 4 (2), pp. 41-47.
2. *Krasnopevtsev B.V.* Fotogrammetriya [Photogrammetry]. Moscow: UPP "Reprografiya" MIIGAiK, 2008, 160 p.

3. *Altukhov V.G.* Issledovaniye tochnosti fotogrammetrii kak metoda opredeleniya ob"ema ob'yekta [Study of the accuracy of photogrammetry as a method for determining the volume of an object], *Avtomatika i programmnaya inzheneriya* [Automation and Software Engineering], 2020, No. 2 (32), pp. 69-74.
4. *Bezmenov V.M.* Primeneniye metodov fotogrammetrii v voprosakh tochnosti obespecheniya prostranstvennogo i uglovogo polozheniya snimkov distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Application of photogrammetry methods in matters of accuracy of ensuring the spatial and angular position of Earth remote sensing images], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa], 2020, No. 17(5), pp. 45-52.
5. *Mikhailova M.V., Akhmedov A.N., Shagibalov R.R.* Fotogrammetriya. Osnovnye printsipy i prakticheskiye primeneniye. Priborostroyeniye, metrologiya i informatsionno-izmeritel'nye pribory, i sistemy [Photogrammetry. basic principles and practical application. Instrumentation, metrology and information-measuring devices, and systems], *Yestestvennyye i tekhnicheskkiye nauki* [Natural and Technical Sciences], 2018, No. 5.
6. *Grushin S.P., Sosnovsky I.A.* Fotogrammetriya v arkhologii - metodika i perspektivy [Photogrammetry in archeology - methods and prospects], *Teoriya i praktika arkhologicheskikh issledovaniy* [Theory and practice of archaeological research], 2018, No. 1 (21).
7. *Katermin V.S.* Fotogrammetriya: 3D-model' iz fotografii [Photogrammetry: 3D model from photographs], *Aktual'nyye nauchnyye issledovaniya v sovremennom mire* [Current scientific research in the modern world], 2021, No. 12-11(80), pp. 89-94.
8. *Chukanov A.N., Tsoi E.V., Yakovenko A.A., Maliy D.V., Goncharov S.S.* Fotogrammetriya v fiksatsii i analize lokalizovannoy deformatsii 3d obraztsov [Photogrammetry in fixation and analysis of localized deformation of 3d samples], *Sovremennyye problemy i napravleniya razvitiya metallovedeniya i termicheskoy obrabotki metallov i splavov* [Modern problems and directions in the development of metal science and heat treatment metals and alloys], 2023, pp. 168-173.
9. *Anufriev V.N.* Sozdaniye trekhmernoy modeli ob'yektov metodami fotogrammetrii [Creating a three-dimensional model of objects using photogrammetry methods: abstract to the thesis], 2022.
10. *Sergeev N.E., Samoilo A.N., Polovko I.Yu.* Ontologicheskoe predstavlenie fotogrammetricheskikh metodov dlya resheniya zadach opredeleniya geometricheskikh parametrov ob'ektov po predvaritel'no obrabotannym tsifrovym izobrazheniyam [Ontological representation of photogrammetric methods for solving problems of determining the geometric parameters of objects from pre-processed digital images], *Vestnik AGU* [Bulletin of ASU], 2020, No. 3(266), pp. 34-39.
11. *Bengio Y., Courville A., Vincent P.* Glubokoye obucheniye [Deep learning transl. from Engl. A.A. Slinkina.]. Moscow: DMK Press, 2018, 482 p.
12. *Rogers A., Hastie M.* Obrabotka yestestvennogo yazyka s pomoshch'yu TensorFlow: sozdaniye prilozheniy dlya mashinnogo obucheniya [Natural language processing with TensorFlow: creating applications for machine learning lane: transl. from Engl. Logunova A.V.]. St. Petersburg: Peter, 2019, 352 p.
13. *Vasiliev I.G., Larionov S.A.* Modeli glubokogo obucheniya dlya obrabotki yestestvennogo yazyka: ucheb. posobiye [Deep learning models for natural language processing: textbook]. Moscow: RUDN, 2020, 119 p.
14. *Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K.* 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*, 2019, pp. 4171-4186.
15. *Liu Y., Ott M., Goyal N., Du J., Joshi M., Chen D., Levy O., Lewis M., Zettlemoyer L., Stoyanov V.* RoBERTa: A Robustly Optimized BERT Pretraining Approach, *arXiv preprint arXiv:1907.11692*, 2019.
16. *Radford A., Wu J., Child R., Luan D., Amodei D., Sutskever I.* Language Models are Unsupervised Multitask Learners, *OpenAI Blog*, 2019, Vol. 1, No. 8.
17. *Reimers N., Gurevych I.* Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks, *Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and the 9th International Joint Conference on Natural Language Processing (EMNLP-IJCNLP)*, 2019, pp. 3980-3990.
18. *Conneau A., Kiela D., Schwenk H., Barrault L., Bordes A.* Supervised Learning of Universal Sentence Representations from Natural Language Inference Data, *Proceedings of the 2017 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, 2017, pp. 670-680.
19. *Pennington J., Socher R., Manning C.D.* GloVe: Global Vectors for Word Representation, *Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*, 2014, pp. 1532-1543.
20. *Mikolov T., Chen K., Corrado G., Dean J.* Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space, *arXiv preprint arXiv:1301.3781*, 2013.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

Козловский Александр Вячеславович – Южный федеральный университет; e-mail: kozlovskiy@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79888980779; кафедра вычислительной техники; ассистент.

Мельник Эдуард Всеволодович – e-mail: evmelnik@sfedu.ru; тел.: +78632184000, кафедра вычислительной техники; профессор.

Самойлов Алексей Николаевич – e-mail: asamoylov@sfedu.ru; тел.: +78632184000; кафедра вычислительной техники; зав. кафедрой.

Kozlovskiy Alexander Vyacheslavovich – Southern Federal University; e-mail: kozlovskiy@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79888980779; the Department of Computer Engineering; assistant.

Melnik Eduard Vsevolodovich – e-mail: evmelnik@sfedu.ru; phone: +78632184000; the Department of Computer Science; professor.

Samoylov Aleksey Nikolayevich – e-mail: asamoylov@sfedu.ru; phone: +78632184000; the Department of Computer Science; head of the Department.

УДК 621.317.3

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-252-265

А.А. Яковлев, М.Ю. Серов, Р.В. Сахабудинов, А.С. Голосий**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРЯДНОГО КОНТУРА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО СТЕНДА МОЛНИЕВОГО РАЗРЯДА**

Устойчивое прохождение ракетой-носителем атмосферного слоя, где могут возникать разряды электричества, обеспечивается не только организационными мерами, но и предварительными наземными испытаниями. Государства, осуществляющие вывод космических аппаратов на орбиту, располагают специальным стендовым оборудованием. Сложилась определенная система взглядов, реализованная в стандартах и других технических документах, требования которых стали обязательны к выполнению. Настоящая работа является логическим продолжением исследований, связанных с созданием высоковольтного стенда молниевого разряда (ВСМР), разрабатываемого для испытаний изделий ракетно-космической техники. Основной задачей ВСМР является генерация заданных электрических (или электромагнитных) импульсов, имитирующих воздействие молниевого разряда на элементы конструкции ракето-носителя. В высоковольтной части ВСМР состоит из четырех генераторов импульсных токов (ГИТ-А, ГИТ-В, ГИТ-С и ГИТ-Д), последовательно подключаемых к нагрузке для создания определённой формы общего токового импульса. Типовые нагрузки включают: стол заземления высоковольтный, стойку вертикальную, приспособление на испытание пробоем. Задачей настоящего этапа работ явилась проверка параметров токового импульса, возникающего при разряде генератора импульсных токов ГИТ-А на калибровочную нагрузку, в качестве которой принимается стол заземления высоковольтный. В статье представлены результаты расчетов параметров импульса компоненты «А» в разрядном контуре в ходе развития процесса генерации импульса: до момента закоротки емкостного накопителя и от момента закоротки. Разрядное устройство «кrouбар» позволяет подключать нагрузку по двухконтурной схеме в момент максимума разрядного тока. Разработаны аналитические зависимости обеих эквивалентных электрических схем подключения контуров. Дифференциальные уравнения решены численным методом, получены графики изменения тока и напряжения колебательного импульса «А» в незакороченном и закороченном контурах. Моделирование позволило оценить динамические характеристики исследуемого контура при его функционировании в одном из самых быстропотекающих и энергоёмких режимов работы. В целом коммутация разрядного контура на стенд заземления высоковольтный с подобранными параметрами подтверждает работоспособность ВСМР и достижение удовлетворительных характеристик заданного токового импульса, реализуемого ГИТ-А.

Молниевый разряд; высоковольтный стенд молниевого разряда; генератор импульсных токов; закоротка; емкостной накопитель; импульс; кrouбар; электрический контур; максимум тока; индуктивность.

A.A. Yakovlev, M.Yu. Serov, R.V. Sakhabudinov, A.S. Golosiy

REVEALING THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF THE DISCHARGE CIRCUIT FOR A HIGH-VOLTAGE LIGHTNING DISCHARGE STAND

The steady passage through the atmospheric layer by the launch vehicle where electricity discharges may occur is ensured not only by performance measures, but also by preliminary ground tests. The countries to be carrying out the launch of spacecraft into the orbit have special bench equipment. A particular system of points views has developed to be implemented in standards and other documents, and the given requirements have become obligatory to meet. The current paper is a following part of the research related to the creation of a high-voltage lightning discharge stand which is being developed for testing rocket and space technology products. The main task of this device is the generation of given electric (or electromagnetic) pulses that simulate the effect of lightning discharge on the structural elements of the launch vehicle. There are four pulse current generators in the high-voltage part such as (pulse current generator-A, pulse current generator-B, pulse current generator-C, pulse current generator-D-types), sequentially connected to the load to create a certain form of a common current pulse. Routine loads include: high-voltage grounding table, vertical rack, breakdown testing device. The task of this stage of work was to check the parameters of the current pulse that occurs when the pulse current generator-A discharges to the calibration load to be the high-voltage grounding table. The article illustrated the calculating findings of the pulse parameters of component A-type in the discharge circuit through the development of the pulse generation process: before the moment of short-circuiting of the capacitive storage and from the moment of short-circuiting. The discharge device such as crowbar allows you to connect the load according to a two-circuit circuit at the time of the maximum discharge current. Analytical dependencies of both equivalent electrical circuits of circuits are covered in the article. Differential equations are solved by numerical method, graphs of change of current and voltage of oscillatory pulse A-type in open and closed circuits are obtained. The given activity as well as the calculations made it possible to evaluate the dynamic characteristics of the studied circuit during its operation in one of the fastest flowing and energy-intensive modes of operation. In general, the switching of the discharge circuit to the high-voltage grounding stand with the selected parameters confirms the operability of the VSMR and the achievement of satisfactory characteristics of the given current pulse implemented by the A.-type.

Lightning discharge; high-voltage lightning discharge stand; pulse current generator; short circuit; capacitive accumulator; pulse; crowbar; electric circuit; current maximum; inductance.

Введение. Начиная с 60-х годов прошлого столетия, в мире резко увеличилось количество научно-исследовательских работ как по физике молниевых разрядов (МР), так и по его взаимодействию с различного рода техническими средствами (ТС) [1–4]. В первую очередь такими ТС являются авиация и ракетно-космическая техника. Это вызвано тем, что эти ТС наиболее часто попадают в область грозовой деятельности [5, 6], а иногда даже могут инициировать образование молниевых разрядов. Эти работы были значительно интенсифицированы в последующие годы, так как на смену малочувствительным к МР электромеханическим и электронным устройствам пришли микроэлектронные устройства (МЭУ). Эти МЭУ, ввиду своей слабости, оказались чрезвычайно чувствительны к электромагнитным помехам и, в первую очередь, к электромагнитным помехам прямых и косвенных молниевых разрядов.

Проведенный анализ воздействия молниевых разрядов показал [7, 8], что на 2000–2500 летных часов приходится один прямой удар МР в летательный аппарат. Поэтому в авиации накоплен огромный опыт парирования последствий воздействия на самолеты молниевых разрядов. В отличие от воздушных судов применение ракетно-космической техники (РКТ), имеет ряд особенностей:

- ◆ время прохождения ракеты-носителя (РН) через опасную зону (примерно 12000 м) составляет от 20 до 60 с;
- ◆ возможен перенос пуска РН при опасном грозовом прогнозе;
- ◆ большинство пусков РН проходят в беспилотном режиме;
- ◆ РН используют двухкомпонентное топливо, вероятность его воспламенения при ударе в топливный бак несколько ниже, чем для авиационного топлива;
- ◆ большинство внешних радиоустройств РН используются в интересах телеметрии и их выход из строя, при ударе МР, не приводит к аварии РН.

Эти обстоятельства и особенности, казалось бы, снижают опасность поражения РН молниевым разрядом, но имеют место ряд существенных факторов, переводящих риски в разряд критически значимых и недопустимых:

- ◆ экономические последствия катастрофы РН могут быть чрезвычайно велики, так как ее стоимость вместе с полезной нагрузкой может достигать миллиардов рублей;
- ◆ экологические последствия катастрофы РН могут быть масштабны, особенно при использовании топлив с высококипящими окислителями;
- ◆ конструкция РН, как правило, включает большое количество пироустройств, несанкционированное срабатывание которых ведет к неизбежной аварии;
- ◆ стартующая РН является мощным источником электромагнитных возмущений, что увеличивает вероятность возникновения МР.

Несмотря на принимаемые организационные и технические меры, защита РКТ от воздействия МР продолжает оставаться насущной проблемой. В 1987 году, при старте с космодрома на мысе Канаверал, в результате удара молнии, была потеряна ракета-носитель АС-67 [9, 10]. В мае 2019 года при старте с космодрома Плесецк, на 14 с полета, молния ударила в РН «Союз-2.1б» [11].

Компетентные в этом вопросе органы в государствах с активной космической деятельностью проводят предварительные натурные испытания объектов авиационной и ракетно-космической техники на молниестойкость. Виды и амплитудно-временные параметры (АВП) электромагнитных помех МР чрезвычайно разносторонни, но все же удалось их систематизировать в несколько типичных видов, которые и были заложены в нормативные документы по молниестойкости. При этом в США накопленный опыт кристаллизован в виде руководящих технических документов SAE ARP 5412: 2013 [12] и SAE ARP 5416: 2013 [13], которые определяют требования к нормированным АВП импульсов тока искусственной молнии. Международный стандарт IEC 62305-1 2010 [14] регламентирует требования к характеристикам тока искусственной молнии, характерного для короткого грозового удара в защищаемый наземный объект и применяемого при испытаниях объектов на молниестойкость. На территории РФ порядок испытаний на молниезащиту воздушных судов регламентирован международными квалификационными требованиями КТ-160D (G) [15] и некоторыми другими документами.

Для проведения испытаний оборудования РКТ на молниестойкость создается специализированный высоковольтный стенд молниевое разряда [16, 20]. В настоящее время разработан технический облик, проведены расчеты и спроектированы компоненты ВСМР [17–19].

Самой трудной проблемой при испытаниях являются испытания высокими токами. Заданная КТ-160D (G) форма обобщенного токового импульса молниевое разряда приведена на рис. 1. Наиболее сложным является реализация компонент А и D, особенно А, у которого фронт нарастания составляет не более 50 мкс, а пиковая амплитуда 200 ± 20 кА.

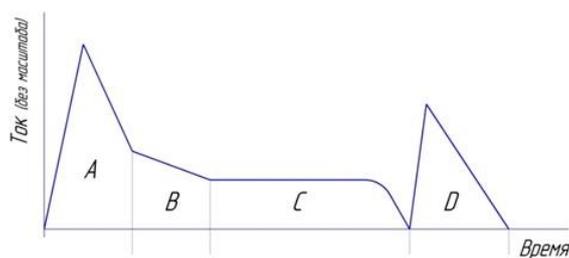


Рис. 1. Форма токового импульса в соответствии с КТ-160D (G)

У генератора тока искусственной молнии УИТОМ-1, созданного в НИПКИ «Молния» НТУ «Харьковский политехнический институт», достигнуты следующие амплитудно-временные параметры компоненты А: амплитуда тока 212 кА, длительность фронта нарастания 32 мкс [21, 22].

Техническая платформа генераторов импульсных токов (ГИТ) компонент А и D отечественного высоковольтного стенда молниевое разряда приведена на рис. 2.

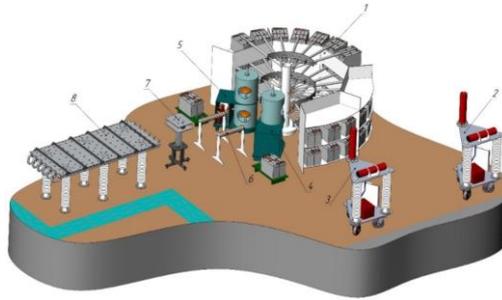


Рис. 2. Общий вид ГИТ-А и ГИТ-Д с нагрузкой (стол заземления высоковольтный):
 1 – ёмкостной накопитель энергии ГИТ-А и ГИТ-Д; 2 – высоковольтное зарядное устройство накопителя энергии ГИТ-А; 3 – высоковольтное зарядное устройство накопителя энергии ГИТ-Д; 4 – управляемый коммутатор/кроубар А; 5 – управляемый коммутатор/кроубар D; 6 – блоки формирования импульсов А и D; 7 – коллектор; 8 – стол заземления высоковольтный

Задачами настоящей работы являются:

- ♦ расчет параметров токового импульса, возникающего при разряде ГИТ-А на калибровочную нагрузку;
- ♦ оценка достижимости с помощью ВСМР заданных параметров токового импульса наиболее энергоёмкой компоненты А.

Логика формирования высоковольтного импульса. Нагрузка ГИТ-А, ГИТ-Д, ГИТ-ВС настраивается при конфигурировании оборудования с помощью блоков формирования. Настройка заключается в подборе индуктивности формирующих катушек и сопротивления формирующих резисторов с целью обеспечения оптимальных для подачи импульса значений общей индуктивности и общего активного сопротивления разрядного контура.

Генератор ГИТ-А выдает импульс в режиме «crowbar» («кроубар»). Основным вариантом применения данного метода является соединение при помощи специального замыкателя (разрядного устройства) насколько возможно накоротко разнополярных выводов емкостного накопителя (ЕН) энергии в момент максимума разрядного тока.

В итоге импульс логически состоит из двух частей: начальной части, с быстрым фронтом в колебательном режиме по одноконтурной схеме (рис. 3), и завершающей части, после шунтирования ЕН, в идеале обеспечивающей аperiodический разряд, по двухконтурной схеме (рис. 6) с более сложным процессом разряда.

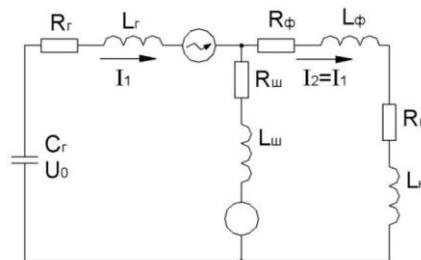


Рис. 3. Схема контура до закоротки: I_1 – ток разряда ЕН (функция времени); I_2 – ток в цепи нагрузки (функция времени); $C_Г$ – емкость ЕН; U_0 – начальное значение напряжения зарядки ЕН; $L_Г$ – собственная индуктивность генератора с учетом индуктивности запускающего разрядника; $L_Ф$ – индуктивность формирующей цепи; $L_н$ – индуктивность нагрузки; $L_ш$ – индуктивность шунтирующей цепи с учетом шунтирующего разрядника; $R_Г$ – собственное омическое сопротивление генератора с учетом запускающего разрядника; $R_Ф$ – омическое сопротивление формирующей цепи; $R_н$ – омическое сопротивление нагрузки; $R_ш$ – омическое сопротивление шунтирующей цепи с учетом шунтирующего разрядника

При разряде генератора тока ГИТ-А импульс поступает на калибровочную нагрузку, в качестве которой принимается стол заземления высоковольтный (рис. 4).

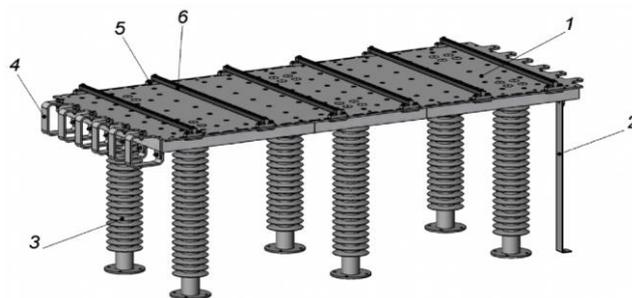


Рис. 4. Стол заземления высоковольтный: 1 – основание; 2 – заземляющая шина; 3 – изолятор; 4 – скоба соединительная; 5 – кронштейн; 6 – направляющая

Стол заземления высоковольтный (СЗВ) предназначен для проведения испытаний бортового оборудования и элементов конструкции РН на прямое воздействие молний. Прямое воздействие молнии (удар) характеризуется плавкой и испарением материалов и узлов конструкции летательного аппарата, разрывами большой площади поверхности (обшивки), электрическим напряжением конструкции, горением, подрывом, выгоранием (обжогом поверхности) и выработкой огромной ЭДС. Объектом испытаний являются элементы конструкции РН, наружная аппаратура. Основой СЗВ является сэндвич, состоящий из двух алюминиевых листов, расположенных один над другим и изолированных друг от друга.

Расчет параметров импульса компоненты А в разрядном контуре до момента закоротки ЕН. Расчетная электрическая схема разряда ЕН до включения разрядника шунтирующей цепи приведена на рис. 3.

В начальный момент времени

$$I = I_1 = I_2 - \text{разрядный ток в контуре (зависит от времени);} \quad (1)$$

U – напряжение на ЕН (зависит от времени);

$$L = L_{\Gamma} + L_{\Phi} + L_{\text{H}} - \text{общая индуктивность контура;} \quad (2)$$

$$R = R_{\Gamma} + R_{\Phi} + R_{\text{H}} - \text{общее омическое сопротивление контура.} \quad (3)$$

Переходный процесс в разрядном контуре описывается уравнениями:

$$U - RI - LI' = 0. \quad (4)$$

$$I = CU', \quad (5)$$

$$U = U_0 - \frac{1}{C_{\Gamma}} \int Idt. \quad (6)$$

Данные уравнения приводятся к виду

$$I'' = -\frac{1}{CL}I - \frac{R}{L}I', \quad (7)$$

$$U'' = -\frac{1}{CL}U - \frac{R}{L}U'. \quad (8)$$

Для определения начальных условий используются обозначения:

I_0 – начальное для расчета значение тока разряда ЕН;

I'_0 – начальное для расчета значение первой производной тока разряда ЕН;

U_0 – начальное для расчета значение напряжения ЕН;

U'_0 – начальное для расчета значение первой производной напряжения ЕН.

В момент $t = 0$ мкс

$$I_0 = 0 \text{ А}, \quad U_0 = 80 \text{ кВ}, \quad U'_0 = 0 \text{ В/с}, \quad I'_0 = U_0/L = 1,143 \cdot 10^{10} \text{ А/с.} \quad (9)$$

Исходные данные для расчета начальной части импульса А:

$$U_0 = 80 \text{ кВ}, \quad C_r = 100,8 \text{ мкФ}, \quad L_r = 2,0 \text{ мкГн}, \quad L\phi = 4,4 \text{ мкГн}, \quad L_n = 0,6 \text{ мкГн},$$

$$L_{ш} = 0,1 \text{ мкГн}, \quad R_r = 0,005 \text{ Ом}, \quad R\phi = 0,12 \text{ Ом}, \quad R_n = 0,005 \text{ Ом}, \quad R_{ш} = 0,1 \text{ Ом}.$$

При этом

$$L = L_r + L\phi + L_n = 7,0 \text{ мкГн}, \quad (10)$$

$$R = R_r + R\phi + R_n = 0,13 \text{ Ом}. \quad (11)$$

Дифференциальные уравнения второго порядка для тока (7) и для напряжения ЕН (8) с указанными начальными условиями решены методом Рунге-Кутты 4-го порядка с фиксированным шагом в программе РТС Mathcad Prime 3.0. Графики изменения тока и напряжения показаны на рис. 5 (время по оси X – в микросекундах).

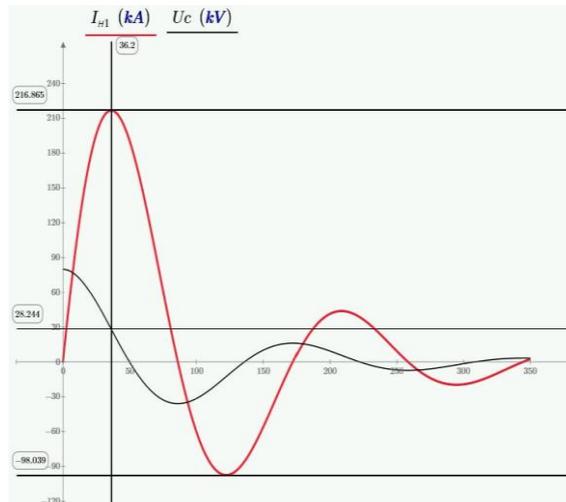


Рис. 5. Графики тока в нагрузке и напряжения ЕН

Из графиков изменения тока и напряжения колебательного импульса А в незакороченном контуре (рис. 5) следует:

- ◆ целесообразное время включения шунтирующего разрядника – время максимума тока $t = 36,2 \text{ мкс}$;
- ◆ величина максимального разрядного тока $I_{\max} = 216,8 \text{ кА}$;
- ◆ величина остаточного напряжения ЕН в момент максимума тока $U_{\text{ост}} = 28,2 \text{ кВ}$.

Следует отметить, что для достижения определенных параметров импульса момент включения шунтирующего разрядника может быть смещен, что является элементом регулировки.

Расчет параметров импульса от момента закоротки ЕН. На рис. 6 представлена схема разрядного контура после закоротки ЕН.

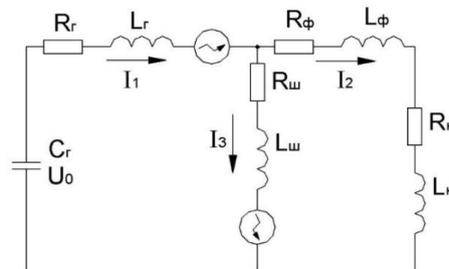


Рис. 6. Схема разрядного контура

Обозначения элементов разрядного контура на рис.6 и в последующих формулах: I_1 – ток разряда ЕН (функция времени); I_2 – ток в цепи нагрузки (функция времени); I_3 – ток в шунтирующей цепи (функция времени); C_{Γ} – емкость ЕН; U_0 – начальное значение напряжения зарядки ЕН; L_{Γ} – собственная индуктивность генератора с учетом индуктивности запускающего разрядника; L_{Φ} – индуктивность формирующей цепи; $L_{\text{н}}$ – индуктивность нагрузки; $L_{\text{ш}}$ – индуктивность шунтирующей цепи с учетом шунтирующего разрядника; R_{Γ} – собственное омическое сопротивление генератора с учетом запускающего разрядника; R_{Φ} – омическое сопротивление формирующей цепи; $R_{\text{н}}$ – омическое сопротивление нагрузки; $R_{\text{ш}}$ – омическое сопротивление шунтирующей цепи с учетом шунтирующего разрядника.

Процесс разряда в контуре описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 = 0 \\ U_0 - \frac{1}{C_{\Gamma}} \int I_1 dt - L_{\Gamma} I_1' - R_{\Gamma} I_1 - L_{\text{ш}} I_3' - R_{\text{ш}} I_3 = 0 \\ -L_{\Phi} I_2' - R_{\Phi} I_2 - L_{\text{н}} I_2' - R_{\text{н}} I_2 + L_{\text{ш}} I_3' + R_{\text{ш}} I_3 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Поскольку

$$I_3 = I_1 - I_2, \quad (13)$$

то

$$\begin{cases} U_0 - \frac{1}{C_{\Gamma}} \int I_1 dt - L_{\Gamma} I_1' - R_{\Gamma} I_1 - L_{\text{ш}} (I_1' - I_2') - R_{\text{ш}} (I_1 - I_2) = 0 \\ -L_{\Phi} I_2' - R_{\Phi} I_2 - L_{\text{н}} I_2' - R_{\text{н}} I_2 + L_{\text{ш}} (I_1' - I_2') + R_{\text{ш}} (I_1 - I_2) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Продифференцировав первое уравнение системы и сгруппировав подобные члены

$$\begin{cases} -\frac{1}{C_{\Gamma}} I_1 - (L_{\Gamma} + L_{\text{ш}}) I_1'' - (R_{\Gamma} + R_{\text{ш}}) I_1' + L_{\text{ш}} I_2'' + R_{\text{ш}} I_2' = 0 \\ -(L_{\Phi} + L_{\text{н}} + L_{\text{ш}}) I_2' - (R_{\Phi} + R_{\text{н}} + R_{\text{ш}}) I_2 + L_{\text{ш}} I_1' + R_{\text{ш}} I_1 = 0 \end{cases} \quad (15)$$

Приведем систему к виду, где в левой части ее уравнений будут вторые производные токов, а в правой токи и их первые производные. Одновременно обозначим коэффициенты при членах уравнений

$$A = \frac{1}{C_{\Gamma}}, \quad (16)$$

$$B = L_{\Gamma} + L_{\text{ш}}, \quad (17)$$

$$C = R_{\Gamma} + R_{\text{ш}}, \quad (18)$$

$$D = L_{\text{ш}}, \quad (19)$$

$$E = R_{\text{ш}}, \quad (20)$$

$$F = L_{\Phi} + L_{\text{н}} + L_{\text{ш}}, \quad (21)$$

$$G = R_{\Phi} + R_{\text{н}} + R_{\text{ш}}, \quad (22)$$

$$H = L_{\text{ш}}, \quad (23)$$

$$J = R_{\text{ш}}. \quad (24)$$

Тогда

$$\begin{cases} -AI_1 - BI_1'' - CI_1' + DI_2'' + EI_2' = 0 \\ -FI_2' - GI_2 + HI_1' + JI_1 = 0 \end{cases} \quad (25)$$

После дифференцирования второго уравнения в системе (25)

$$\begin{cases} -AI_1 - BI_1'' - CI_1' + DI_2'' + EI_2' = 0 \\ -FI_2'' - GI_2' + HI_1'' + JI_1' = 0 \end{cases} \quad (26)$$

После преобразования первого уравнения (умножив на F и разделив на D):

$$-\frac{AF}{D}I_1 - \frac{BF}{D}I_1'' - \frac{CF}{D}I_1' + FI_2'' + \frac{EF}{D}I_2' = 0 \quad (27)$$

После сложения полученного выражения (27) со вторым уравнением в системе уравнений (26):

$$-\frac{AF}{D}I_1 - \frac{BF}{D}I_1'' - \frac{CF}{D}I_1' + \frac{EF}{D}I_2' - \underline{\underline{GI_2'}} + \underline{\underline{HI_1''}} + \underline{\underline{JI_1'}} = 0 \quad (28)$$

$$I_1'' = \frac{\left[-\frac{AF}{D}I_1 - \left(\frac{CF}{D} - J \right) I_1' + \left(\frac{EF}{D} - G \right) I_2' \right]}{\left(\frac{BF}{D} - H \right)} \quad (29)$$

После аналогичных преобразований и для второго уравнения из системы уравнений (26):

$$I_2'' = \frac{\left[-\left(\frac{GB}{H} - E \right) I_2' + \left(\frac{JB}{H} - C \right) I_1' - AI_1 \right]}{\left(\frac{FB}{H} - D \right)} \quad (30)$$

Уравнения (29) и (30) составляют систему в преобразованном виде:

$$\begin{cases} I_1'' = -\frac{AF}{D\left(\frac{BF}{D} - H\right)}I_1 - \frac{\left(\frac{CF}{D} - J\right)}{\left(\frac{BF}{D} - H\right)}I_1' + \frac{\left(\frac{EF}{D} - G\right)}{\left(\frac{BF}{D} - H\right)}I_2' \\ I_2'' = -\frac{\left(\frac{GB}{H} - E\right)}{\left(\frac{FB}{H} - D\right)}I_2' + \frac{\left(\frac{JB}{H} - C\right)}{\left(\frac{FB}{H} - D\right)}I_1' - \frac{A}{\left(\frac{FB}{H} - D\right)}I_1 \end{cases} \quad (31)$$

Упорядочив коэффициенты при членах система в окончательном виде имеет вид:

$$\begin{cases} I_1'' = -\frac{AF}{(BF - DH)}I_1 - \frac{(CF - DJ)}{(BF - DH)}I_1' + \frac{(EF - DG)}{(BF - DH)}I_2' \\ I_2'' = -\frac{(BG - EH)}{(BF - DH)}I_2' + \frac{(BJ - CH)}{(BF - DH)}I_1' - \frac{AH}{(BF - DH)}I_1 \end{cases} \quad (32)$$

Для решения был также применен метод Рунге-Кутты 4-го порядка с фиксированным шагом в программе PTC Mathcad Prime 3.0.

Определения начальных условий для расчета. Исходную систему (1) можно представить в виде

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 = 0 \\ U_C - LrI_1' - RrI_1 - LmI_3' - RmI_3 = 0 \\ -L\phi I_2' - R\phi I_2 - LnI_2' - RnI_2 + LmI_3' + RmI_3 = 0 \end{cases} \quad (33)$$

где

$$U_C = U_0 - \frac{1}{C_r} \int I_1 dt \quad (34)$$

После преобразований

$$\begin{cases} U_C - BI_1' - CI_1 + DI_2' + EI_2 = 0 \\ -FI_2' - GI_2 + HI_1' + JI_1 = 0 \end{cases} \quad (35)$$

Полученная в общем виде система (35) при подстановке известных величин позволяет рассчитать значения первых производных токов в начальный момент. Для момента закоротки известны величины токов и остаточного напряжения. Подставив их значения в систему, получим:

$$\begin{cases} U_{OCT} - BI_{10}' - CI_{10} + DI_{20}' + EI_{20} = 0 \\ -FI_{20}' - GI_{20} + HI_{10}' + JI_{10} = 0 \end{cases} \quad (36)$$

где I_{10}' – значение первой производной тока разряда ЕН в момент закоротки;

I_{20}' – значение первой производной тока в цепи нагрузки в момент закоротки;

I_{10} – значение тока разряда ЕН в момент закоротки (известно);

I_{20} – значение тока в цепи нагрузки в момент закоротки (известно);

U_{OCT} – остаточное напряжение ЕН в момент закоротки (известно).

Решим второе уравнение системы (36) относительно производной тока I_{20}'

$$I_{20}' = \frac{(-GI_{20} + HI_{10}' + JI_{10})}{F} \quad (37)$$

и, подставив в первое уравнение, получим:

$$I_{10}' = \frac{F}{(BF - DH)} U_{OCT} - \frac{(CF - DJ)}{(BF - DH)} I_{10} - \frac{(DG - EF)}{(BF - DH)} I_{20}' \quad (38)$$

Подставив (38) в (37) и упростив, имеем

$$I_{20}' = \frac{H}{(BF - DH)} U_{OCT} - \frac{(GB - HE)}{(BF - DH)} I_{20} - \frac{(HC - JB)}{(BF - DH)} I_{10} \quad (39)$$

Два последних выражения (38) и (39) определяют значения производных токов в момент закоротки.

Результаты моделирования. На рис. 7 приведены графики токов после закоротки (по двухконтурной схеме), полученные расчетом в программе PTC Mathcad Prime 3.0 методом Рунге-Кутты 4-го порядка с фиксированным шагом (время по оси X – в микросекундах).

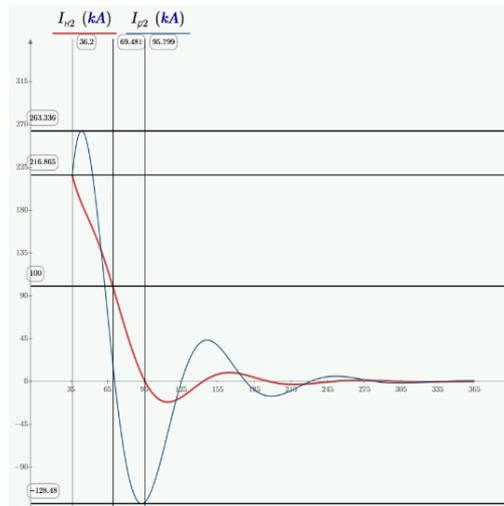


Рис. 7. Графики токов разряда ЕН I_{p2} (I_1 в формулах) и в цепи нагрузки I_{n2} (I_2 в формулах)

В результате закорачивания ЕН в момент максимума тока емкостной накопитель разряжается через цепь шунтирования в колебательном режиме, а энергия, запасенная в формирующей катушке индуктивности и общей индуктивности нагрузочной части контура, рассеивается на общем сопротивлении участков цепи. В зависимости от нагрузки в контуре и линии шунтирования нагрузочный ток спадает быстро, либо с небольшими колебаниями, либо аperiodически.

При исходных данных $U_0 = 80$ кВ, $C_T = 100,8$ мкФ, $L_T = 2,0$ мкГн, $L\phi = 4,4$ мкГн, $L_H = 0,6$ мкГн, $L_{ш} = 0,1$ мкГн, $R_T = 0,005$ Ом, $R\phi = 0,12$ Ом, $R_H = 0,005$ Ом, $R_{ш} = 0,1$ Ом, в результате моделирования получен график результирующего импульса, приведенный на рис. 8.

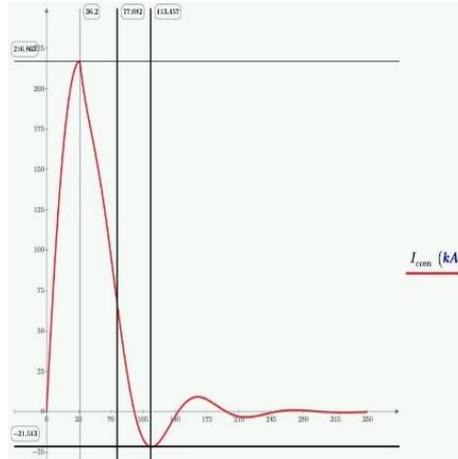


Рис. 8. Ток импульса А, полученного методом "crowbar". Закоротка ЕН в момент максимума тока

Максимум разрядного тока $I_{max} = 216,8$ кА будет достигнут в момент времени $t = 36,2$ мкс (время нарастания фронта). При этом остаточное напряжение ЕН $U_{ост} = 28,2$ кВ, $I'_{10} = 1,269 \cdot 10^{10}$ А/с, $I'_{20} = -5,066 \cdot 10^9$ А/с.

На рис. 9 приведен график накопления интеграла действия импульса А с закороткой ЕН в момент максимума тока.

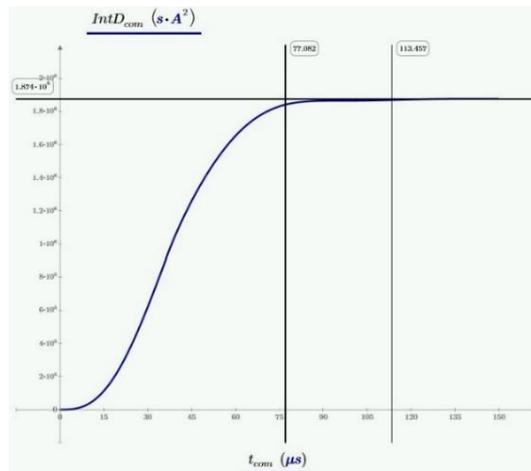


Рис. 9. График накопления интеграла действия в импульсе А с закороткой ЕН в момент максимума тока

Импульс тока переносит энергию немного меньшую, чем требуется в соответствии с квалификационными требованиями КТ-160G, хотя остальные параметры импульса удовлетворительны. Вариантом увеличения интеграла действия при неизменной емкости ЕН является увеличение времени от начала импульса до момента закоротки.

Соответственно на рис. 10 и 11 представлен вариант изменения момента закоротки не при максимуме разрядного тока $I_{max} = 216,8$ кА при $t = 36,2$ мкс, а в момент времени $t = 44,2$ мкс.

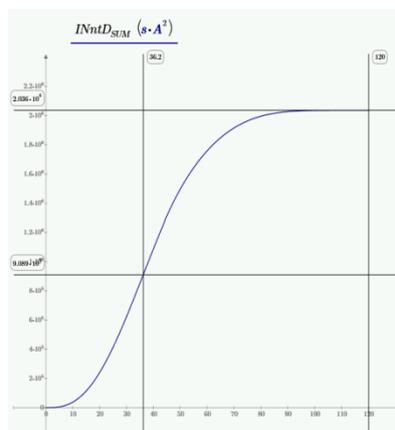


Рис.10. График накопления интеграла действия в импульсе А с закороткой в момент $t = 44,2$ мкс

Таким образом, при удовлетворительных величине и временных характеристиках тока в нагрузке достигнута необходимая величина интеграла действия (в соответствии с квалификационными требованиями КТ-160G интеграл действия импульса А должен быть равен $(2 \cdot 10^6 \pm 20 \%) \text{ A}^2\text{s}$).

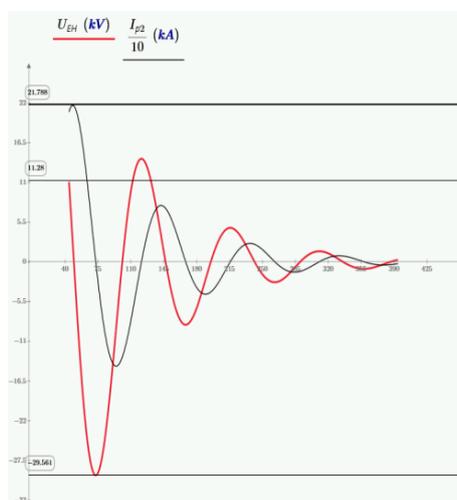


Рис. 11. График тока разрядки и напряжения ЕН после закоротки в момент $t = 44,2$ мкс

Заключение:

1. Целью исследований являлась качественная и количественная оценка значений параметров импульсов, полученных в эквивалентных разрядных контурах генератора ГИТ-А. В ходе расчетов и моделирования проанализированы различные ситуации развития динамики процесса в ходе разряда емкостного накопителя на калибровочную нагрузку. Установлено, что максимум разрядного тока $I_{max} = 216,8$ кА достигается в момент

времени $t = 36,2$ мкс. Это обеспечивало требования КТ-160G и по амплитуде, и по длительности фронта нарастания импульса, однако не достигалось заданное значение интеграла действия. Если сдвинуть момент коротки до $t = 44,2$ мкс, то все заданные требования обеспечиваются в одной реализации.

2. В силу влияния нелинейности некоторых физических величин при протекании быстрых импульсов большого тока, а также возможных случайных неучтенных факторов, важным обстоятельством является тот факт, что аппаратные возможности изменения настроек контура находятся в достаточно широких пределах.

3. Колебательный характер процесса разряда может оказывать отрицательное влияние на ресурсные характеристики емкостного накопителя (конденсаторов), что должно явиться предметом дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Базелян М., Горин Б.Н., Левитов В.И.* Физические и инженерные основы молниезащиты. – Л.: Гидрометеониздат, 1978. – 223 с.
2. *Баранов М.И.* Избранные вопросы электрофизики: монография: в 3 т. Т. 2. Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Точка, 2010. – 407 с.
3. *Бургсдорф В.Ф.* Параметры токов молнии и выбор их расчетных значений // *Электричество*. – 1990. – № 2. – С. 9-24.
4. *Uman M.A.* Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards // *Proceedings of the IEEE*. – 1988. – Vol. 76, No. 12. – P. 1548-1565. – DOI: 10.1109/5.16349.
5. *Phillpoy J.* Lightning strike // *Flight International*. – 1972. – No. 3316. – P. 414.156.
6. *Plumer J.A., Perry B.L.* An Analysis of Lightning strikes in Airline Operation in the USA and Europe // *Conference on Lightning and static Electricity, England, April 14-17, 1975*. – P. 502-513.
7. Обработка и анализ случаев поражения самолетов гражданской авиации разрядами атмосферного электричества. Отчет о НИР №ГР80059418, Инв. № Б887910. – Рига. ГосНИИ ЭР АТ ГА, 1980. – 88 с.
8. *Aufbauer H.* Atmosphärische Entladungen auf Luftfahrzeuge // *Electrofechn und Maschinenbau*. – 1978. – No. 9. – P. 417-421.
9. Scully Robert. Lightning Protection for the Orion Space Vehicle NASA: Johnson Space Centre. Houston, Texas. – 77058-3696. – (Professional English). – Text: direct. – 10 p.
10. *Bachelier E., Issac F., Quenum W., Enjablert V., Mohedano L.* Lightning Protection of SOYUZ and VEGA launching pads // *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria*. – 6 p.
11. Молния ударила в ракету «Союз» при старте с Плесецка. 27 мая 2019. – URL: <https://tass.ru/proisshestiya/6475178> (дата обращения 18.01.2021).
12. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms // *SAE Aerospace*. – USA, 2013. – P. 1-56.
13. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods // *SAE Aerospace*. – USA, 2013. – P. 1-145.
14. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». – Geneva, IEC Publ., 2010.
15. КТ-160D. Квалификационные требования РФ. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний. – М. Госстандарт РФ, 2004.
16. *Голосий А.С., Карловский М.Ю., Самаркин А.Л., Сахабудинов Р.В.* Стенд испытаний на стойкость ракеты-носителя к воздействию молниевых разрядов // II Всероссийский форум «Взгляд молодежи на пути развития ОПК»: Сб. тезисов, Реутов, 3-4 июня, 2021 г. – С. 45-53.
17. *Бурлуцкий С.Г., Голосий А.С., Ковалев А.П., Сахабудинов Р.В.* Оценивание характеристик токовых генераторов имитации молниевых разрядов // *Тр. ВКА им. А.Ф. Можайского*. – 2022. – Вып. 682. – С. 171-182.
18. *Шишков Д.В., Яковлев А.А., Сахабудинов Р.В., Голосий А.С.* Расчет параметров токовых импульсов в разрядных контурах высоковольтного стенда молниевых разрядов // Сб. материалов научно-технической конференции «Моделирование параметров атмосферы при применении систем вооружения». – Королев: ФГБУ «4 ЦНИИ» Минобороны России, 2022. – С. 47-51.
19. *Серов М.Ю., Яковлев А.А., Сахабудинов Р.В., Голосий А.С.* Параметрический анализ результатов расчета испытательных импульсов в эквивалентных контурах ГИТ-А, ГИТ-Д, ГИТ-ВС // Сб. докладов ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 23-25 ноября 2022. – С. 222-226.

20. Овчинникова Н.А., Сахабудинов Р.В., Голосий А.С. Создание стендов моделирования прямого и непрямого воздействия молниевых разрядов на элементы ракетно-космической техники // Сб. докладов Пятой Международной научной конференции «Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии», 4-20 апреля 2024. – СПб.: ГУАП, 2024. – С. 111-115.
21. Баранов М.И., Буряковский С.Г., Рудаков С.В. Инструментальное обеспечение в Украине натурных испытаний объектов энергетики, авиационной и ракетно-космической техники на стойкость к воздействию импульсного тока искусственной молнии // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2018. – № 4. – С. 45-53. – ISSN 2074-272X.
22. Баранов М.И., Буряковский С.Г., Рудаков С.В. Метрологическое обеспечение в Украине испытаний объектов энергетики, авиационной и ракетно-космической техники на стойкость к воздействию импульсов тока (напряжения) искусственной молнии и коммутационных импульсов напряжения // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2018. – № 5. – С. 44-53. – ISSN 2074-272X.

REFERENCES

1. Bazelyan E.M., Gorin B.N., Levitov V.I. *Fizicheskie i inzhenernye osnovy molniezashchity* [Physical and engineering foundations of lightning protection]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978, 223 p.
2. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: monografiya: v 3 t. T. 2. Kn. 2: Teoriya elektrofizicheskikh effektov i zadach* [Selected issues of electrophysics: monograph: in 3 vol. Vol. 2, Book 2: Theory of electrophysical effects and problems]. Khar'kov: Tochka, 2010, 407 p.
3. Burgsdorf V.F. Parametry tokov molnii i vybor ikh raschetnykh znacheniy [Parameters of lightning currents and the choice of their design values], *Elektrichestvo* [Electricity], 1990, No. 2, pp. 9-24.
4. Uman M.A. Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards, *Proceedings of the IEEE*, 1988, Vol. 76, No. 12, pp. 1548-1565. DOI: 10.1109/5.16349.
5. Phillpoy J. Lightning strike, *Flight International*, 1972, No. 3316, pp. 414-156.
6. Plumer J.A., Perry B.L. An Analysis of Lightning strikes in Airline Operation in the USA and Europe, *Conference on Lightning and static Electricity, England, April 14-17, 1975*, pp. 502-513.
7. Obrabotka i analiz sluchaev porazheniya samoletov grazhdanskoj aviatsii razryadami atmosfernogo elektrichestva. Otchet o NIR №GR80059418, Inv. № B887910 [Processing and analysis of cases of damage to civil aviation aircraft by atmospheric electricity discharges. Research report No. GR80059418, Inv. No. B887910]. Riga. GosNII ER AT GA, 1980, 88 p.
8. Aufbauer H. Atmosphärische Entladungen auf Luftfahrzeuge, *Electrotechn und Maschinenbau*, 1978, No. 9, pp. 417-421.
9. Scully Robert. Lightning Protection for the Orion Space Vehicle NASA: Johnson Space Centre. Houston, Texas. 77058-3696. (Professional English). Text: direct, 10 p.
10. Bachelier E., Issac F., Quenum W., Enjablert V., Mohedano L. Lightning Protection of SOYUZ and VEGA launching pads, *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria*, 6 p.
11. Molniya udarila v raketu «Soyuz» pri starte s Plesetska. 27 maya 2019 [Lightning struck the Soyuz rocket during launch from Plesetsk. May 27, 2019]. Available at: <https://tass.ru/proisshestiya/6475178> (accessed 18 January 2021).
12. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms, *SAE Aerospace*. USA, 2013, pp. 1-56.
13. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods, *SAE Aerospace*. USA, 2013, pp. 1-145.
14. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
15. KT-160D. Kvalifikatsionnye trebovaniya RF. Usloviya ekspluatatsii i okruzhayushchey sredy dlya bortovogo aviatsionnogo oborudovaniya. Trebovaniya, normy i metody ispytaniy [KT-160D. Qualification requirements of the Russian Federation. Operating and environmental conditions for avionics equipment. Requirements, standards and test methods]. Moscow: Gosstandart RF, 2004.
16. Golosiy A.S., Karlovskiy M.Yu., Samarkin A.L., Sakhabudinov R.V. Stend ispytaniy na stoykost' rakety-nositelya k vozdeystviyu molnievogo razryada [Test bench for the resistance of the launch vehicle to the effects of lightning discharge], *II Vserossiyskiy forum «Vzglyad molodezhi na puti razvitiya OPK»: Sb. tezisov, Reutov, 3-4 iyunya, 2021 g.* [II All-Russian Forum “Youth’s view on the development of the defense industry”: Collection of abstracts, Reutov, June 3-4, 2021], pp. 45-53.
17. Burlutskiy S.G., Golosiy A.S., Kovalev A.P., Sakhabudinov R.V. Otsenivanie kharakteristik tokovykh generatorov imitatsii molnievykh razryadov [Assessing the characteristics of current generators simulating lightning discharges], *Tr. VKA im. A.F. Mozhayskogo* [Proceedings of VKA im. A.F. Mozhayskiy], 2022, Issue 682, pp. 171-182.

18. *Shishkov D.V., Yakovlev A.A., Sakhabudinov R.V., Golosiy A.S.* Raschet parametrov tokovykh impul'sov v razryadnykh konturakh vysokovol'nogo stenda molnievogo razryada [Calculation of the parameters of current pulses in the discharge circuits of a high-voltage lightning discharge stand], *Sb. materialov nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Modelirovanie parametrov atmosfery pri primenenii sistem vooruzheniya»* [Collection of materials of the scientific and technical conference "Modeling atmospheric parameters when using weapons systems"]. Korolev: FGBU «4 TSNII» Minoborony Rossii, 2022, pp. 47-51.
19. *Serov M.Yu., Yakovlev A.A., Sakhabudinov R.V., Golosiy A.S.* Parametricheskii analiz rezul'tatov rascheta ispytatel'nykh impul'sov v ekvivalentnykh konturakh GIT-A, GIT-D, GIT-VS [Parametric analysis of the results of calculating test pulses in equivalent circuits GIT-A, GIT-D, GIT-VS], *Sb. dokladov VUNTS VVS «VVA im. prof. N.E. Zhukovskogo i YU.A. Gagarina», 23-25 noyabrya 2022* [Collection of reports of the VUNC Air Force "VVA named after. prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", November 23-25, 2022], pp. 222-226.
20. *Ovchinnikova N.A., Sakhabudinov R.V., Golosiy A.S.* Sozдание stendov modelirovaniya pryamogo i nepryamogo vozdeystviya molnievogo razryada na elementy raketno-kosmicheskoy tekhniki [Creation of stands for modeling the direct and indirect effects of lightning discharge on elements of rocket and space technology], *Sb. dokladov Pyatoy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Aerokosmicheskoe priborostroenie i ekspluatatsionnye tekhnologii», 4-20 aprelya 2024* [Collection of reports of the Fifth International Scientific Conference "Aerospace Instrumentation and Operational Technologies", April 4-20, 2024]. Saint Petersburg: GUAP, 2024, pp. 111-115.
21. *Baranov M.I., Buryakovskiy S.G., Rudakov S.V.* Instrumental'noe obespechenie v Ukraine naturnykh ispytaniy ob'ektov energetiki, aviatsionnoy i raketno-kosmicheskoy tekhniki na stoykost' k vozdeystviyu impul'snogo toka iskusstvennoy molnii [Instrumental support in Ukraine for full-scale testing of energy facilities, aviation and rocket and space technology for resistance to the effects of pulsed current of artificial lightning], *Elektrotehnika i Elektromekhanika* [Electrical engineering and electromechanics], 2018, No. 4, pp. 45-53. ISSN 2074-272X.
22. *Baranov M.I., Buryakovskiy S.G., Rudakov S.V.* Metrologicheskoe obespechenie v Ukraine ispytaniy ob'ektov energetiki, aviatsionnoy i raketno-kosmicheskoy tekhniki na stoykost' k vozdeystviyu impul'sov toka (napryazheniya) iskusstvennoy molnii i kommutatsionnykh impul'sov napryazheniya [Metrological support in Ukraine for testing energy facilities, aviation and rocket and space technology for resistance to the effects of current (voltage) pulses of artificial lightning and switching voltage pulses], *Elektrotehnika i Elektromekhanika* [Electrical engineering and electromechanics], 2018, No. 5, pp. 44-53. ISSN 2074-272X.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.А. Костоготов.

Яковлев Александр Анатольевич – АО «Конструкторское бюро «Арсенал» им. М.В. Фрунзе; e-mail: aa.yakovlev@kbarsenal.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79052500726; к.т.н.; начальник управления.

Серов Михаил Юрьевич – e-mail: miyuserov@yandex.ru; тел.: +79112529380; ведущий инженер.

Сахабудинов Роман Владиславович – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; e-mail: sahabudinov@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79211852881; к.т.н.; доцент.

Голосий Александр Сергеевич – e-mail: a.s.golosiy@mail.ru; тел.: +79213025903; к.т.н.; доцент.

Yakovlev Aleksandr Anatolievich – ARSENAL DESIGN BUREAU JSK; e-mail: aa.yakovlev@kbarsenal.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79052500726; cand. of eng. sc.; head of department.

Serov Mikhail Yurievich – e-mail: miyuserov@yandex.ru; phone: +79112529380; senior engineer.

Sakhabudinov Roman Vladislavovich – Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: stapler1@yandex.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79211852881; cand. of eng. sc.; associate professor.

Golosiy Aleksandr Sergeevich – e-mail: a.s.golosiy@mail.ru; phone: +79213025903; cand. of eng. sc.; associate professor.

Раздел IV. Электроника, нанотехнологии и приборостроение

УДК 621.382

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-266-275

Н.М. Богатов, В.С. Володин, Л.Р. Григорьян, М.С. Коваленко

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ N-P ПЕРЕХОДА

Структура и свойства полупроводниковых приборов в значительной степени зависят от распределения внутреннего электрического поля, которое создается распределением ионизированных примесей. Одним из способов контролируемого введения доноров, акцепторов является их диффузия в объем полупроводника. Существование поверхностных электронных состояний в зоне запрещенных энергий неконтролируемым образом влияет на распределение электрического поля в поверхностной области. Целью исследования является анализ влияния поверхностных состояний на распределение электрического поля в диффузионном n-p переходе. Задачи исследования. 1 – Разработать алгоритм численного решения уравнения Пуассона, учитывающий общую электронейтральность n-p перехода и плотность поверхностных состояний в эмиттере. 2 – Рассчитать численно распределения электрического потенциала, напряжённости электрического поля, концентрации электронов и дырок в диффузионном n-p переходе. 3 – Проанализировать влияние поверхностных состояний на изменение внутреннего электрического поля и скорость поверхностной рекомбинации неравновесных носителей заряда. В результате численно промоделировано влияние поверхностных состояний на распределение электрического поля в диффузионном n-p переходе в кремнии. Модель основана на численном решении уравнения Пуассона с граничными условиями, включающими условие общей электронейтральности образца. Показано, что плотность электронных состояний на поверхности эмиттера создает узкую область распределения плотности электрического заряда. Максимальное значение модуля напряжённости электрического поля в этой области превышает аналогичное значение в n-p переходе в три раза и более. Напряжённость электрического поля, обусловленная поверхностным зарядом, направляет неосновные носители заряда к поверхности, что повышает эффективную скорость их рекомбинации. Уменьшение плотности поверхностного заряда или изменение его знака является одной из задач технологии полупроводниковых приборов.

N-p переход; потенциал электрического поля; уравнение Пуассона; поверхностные состояния; электроны; дырки; кремний.

N.M. Bogatov, V.S. Volodin, L.R. Grigoryan, M.S. Kovalenko

INFLUENCE OF SURFACE STATES ON THE ELECTRIC FIELD OF THE N-P JUNCTION

The structure and properties of semiconductor devices largely depend on the distribution of the internal electric field, which is created by the distribution of ionized impurities. One of the methods for the controlled introduction of donors and acceptors is their diffusion into the bulk of the semiconductor. The existence of surface electronic states in the band of forbidden energies has an uncontrollable effect on the distribution of the electric field in the surface region. The purpose of the study is to analyze the influence of surface states on the distribution of the electric field in a diffusion n-p junction. Research objectives. 1 – Develop an algorithm for the numerical solution of the Poisson equation, taking into account the general electrical neutrality of the n-p junction and the density of surface states in the emitter. 2 – Calculate numerically the distributions of electric potential, electric field strength, electron and hole concentrations in a diffusion n-p junction. 3 – Analyze the influence of surface states on the change in the internal electric field and the rate of surface recombination of nonequilibrium charge carriers. As a result, the influence of surface states on the

electric field distribution in a diffusion n-p junction in silicon was numerically simulated. The model is based on a numerical solution of the Poisson equation with boundary conditions that include the condition of the overall electrical neutrality of the sample. It is shown that the density of electronic states on the emitter surface creates a narrow range of electric charge density distribution. The maximum value of the modulus of the electric field strength in this region exceeds the similar value in the n-p junction by three times or more. The electric field strength caused by the surface charge directs minority charge carriers towards the surface. This increases the effective rate of their recombination. Reducing the surface charge density or changing its sign is one of the tasks of semiconductor device technology.

N-p junction; electric field potential; Poisson's equation; surface states; electrons; holes; silicon.

Введение. Распределение внутреннего электрического поля в значительной степени определяет энергетическую структуру и свойства полупроводниковых приборов. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) этих приборов зависят от совокупности их свойств. Анализ параметров ВАХ – один из методов диагностики диодов и фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) [1–3]. Интерпретация ВАХ основана на теоретических моделях полупроводниковых структур и транспорта носителей заряда [4, 5].

Современная электроника требует уменьшения размеров элементов с *n-p* переходами. Это приводит к возрастанию влияния поверхности. Плотность поверхностных состояний в запрещенной зоне обуславливает образование поверхностного заряда и рекомбинацию через эти состояния.

Накопление неравновесного поверхностного заряда на границе Si-SiO₂ является одной из причин снижения эффективности собирания фотогенерированных носителей заряда [6, 7]. В работе [8] экспериментально доказано отрицательное влияние туннельно-рекомбинационных переходов электронов через поверхностные состояния на границе раздела Si-ITO на эффективность разделения неравновесных электронов, дырок в ФЭП. Поверхностный электрический потенциальный барьер, созданный поверхностными зарядами, препятствует транспорту носителей заряда через поверхность [9].

Теоретический и экспериментальный анализ особенностей распределения электрического поля в поверхностной области для структур, содержащих *n-p* переход, является актуальным, так как результаты позволят повысить эффективность ФЭП [10] и стабильность диодов [11].

Цель работы – проанализировать влияние поверхностных состояний на распределение электрического поля в диффузионном *n-p* переходе.

Методика численного моделирования. Потенциал электрического поля является решением уравнения Пуассона. Численные алгоритмы решения этого уравнения для сложных многомерных задач активно совершенствуются [12–14]. Для достижения сформулированной цели достаточно решить одномерную задачу.

Распределение потенциала электрического поля $\varphi(x)$ в диффузионном *n-p* переходе с учетом поверхностных состояний является решением уравнения Пуассона

$$\frac{d^2}{dx^2} \varphi(x) = -\frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} (p(x) - n(x) + N^{ion}(x) + N_s(x)), \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость вещества, ε_0 – диэлектрическая постоянная, q – элементарный заряд, $p(x)$ – концентрация дырок, $n(x)$ – концентрация электронов, $N^{ion}(x)$ – концентрация ионизированных доноров и акцепторов, $N_s(x)$ – плотность дефектов в поверхностной области, создающих энергетические уровни в запрещенной зоне.

Геометрическая схема *n-p* перехода показана на рис. 1: при $-w_n \leq x \leq -d_n$ расположен эмиттер *n*-типа проводимости, w_n – глубина залегания *n-p* перехода; при $-d_n < x < d_p$ расположена область, обедненная носителями заряда, (ООНЗ), в которой $n(x) \ll |N^{ion}(x)|$, $p(x) \ll |N^{ion}(x)|$; при $d_p \leq x \leq w_p$ расположена база *p*-типа проводимости, в которой выполняется условие локальной нейтральности, w_p – толщина базы.

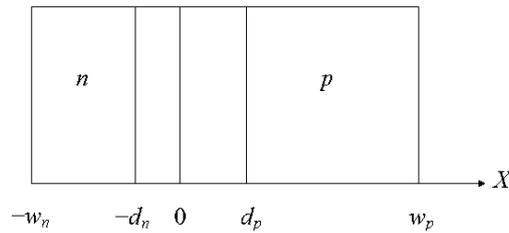


Рис. 1. Схема n-p перехода

Концентрация примесей $N(x) = N_D(x) - N_A$ при $-w_n \leq x \leq w_p$, где $N_D(x)$ – концентрация доноров, $N_A = const$ – концентрация акцепторов. В модели диффузии из неограниченного источника [15]

$$N_D(x) = N_{D0} \operatorname{erfc}\left(\frac{(x + w_n)}{x_0}\right). \tag{2}$$

где N_{D0} – концентрация доноров на поверхности $x = -w_n$, $x_0 = 2\sqrt{D_d t_d}$, D_d – коэффициент диффузии доноров, зависящий от температуры, t_d – время диффузии.

Концентрация ионизованных доноров и акцепторов определяется формулами [16]

$$N_D^{ion}(x) = \frac{N_D(x)}{1 + g_d e^{\frac{F-E_d}{kT}}}, \quad N_A^{ion} = \frac{N_A}{1 + g_a e^{\frac{E_a-F}{kT}}}, \tag{3}$$

где F – электрохимический потенциал (уровень Ферми), k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, E_d – энергетический уровень донорной примеси в запрещенной зоне, g_d – фактор вырождения донорного уровня, E_a – энергетический уровень акцепторной примеси в запрещенной зоне, g_a – фактор вырождения акцепторного уровня. Металлургическая граница n-p перехода расположена при $x = 0$, где выполняется условие $N^{ion}(0) = 0$, являющееся уравнением для определения параметра x_0 в формуле (2).

Плотность состояний, созданных дефектами в поверхностной области, изменяется от максимального значения N_{surf} при $x = -w_n$ до 0 при $x = w_{surf} - w_n$:

$$N_s(x) = \begin{cases} N_{surf} \frac{w_{surf} - w_n - x}{w_{surf}}, & \text{при } -w_n \leq x < (w_{surf} - w_n), \\ 0, & \text{при } (w_{surf} - w_n) \leq x \leq w_p \end{cases} \tag{4}$$

где w_{surf} – толщина поверхностного слоя. Плотность поверхностных состояний

$$N_{ss} = \int_{-w_n}^0 N_s(x) dx = \frac{1}{2} N_{surf} w_{surf}.$$

Концентрации носителей заряда $n(x)$, $p(x)$ рассчитываются по формулам [16]

$$n(x) = N_c e^{\frac{F-E_g+q\phi(x)}{kT}}, \quad p(x) = N_v e^{\frac{-F-q\phi(x)}{kT}}, \tag{5}$$

где N_c – эффективная плотность электронных состояний в окрестности дна зоны проводимости, N_v – эффективная плотность электронных состояний в окрестности вершины валентной зоны, E_g – ширина запрещенной зоны. Уровень Ферми F отсчитывается от вершины валентной зоны в точке $x = w_p$.

Условие общей электронейтральности структуры

$$\int_{-w_n}^{w_p} (p(x) - n(x) + N^{ion}(x) + N_s(x)) dx = 0 \quad (6)$$

является дополнительным условием для уравнения (1). Из условия (6) следует, что

$$\left. \frac{d}{dx} \varphi(x) \right|_{x=-w_n} = \left. \frac{d}{dx} \varphi(x) \right|_{x=w_p}. \quad (7)$$

В базе в равновесных условиях напряженность электрического поля $E(x) = -\frac{d}{dx} \varphi(x)$ равна нулю, тогда условие (7) принимает вид

$$\left. \frac{d}{dx} \varphi(x) \right|_{x \leq -w_n} = 0. \quad (8)$$

Начало отсчета электрического потенциала выбирается произвольно, поэтому $\varphi(w_p) = 0$. Равновесное значение F является решением уравнения $p(w_p) - n(w_p) + N^{ion}(w_p) = 0$ (условие локальной нейтральности базы).

Из (8) следует, что $\varphi(x) = \varphi_0$ при $x \leq -w_n$. Значение φ_0 определяется итерационно в процессе численного решения уравнения (1).

Уравнение (1) в разностной форме (9) решалось численно методом последовательных приближений.

$$\begin{aligned} & \frac{\varphi^j(x-h) - 2\varphi^j(x) + \varphi^{j-1}(x+h)}{h^2} = \\ & = -\frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} \left(N_v e^{\frac{-F - q\varphi^j(x)}{kT}} - N_c e^{\frac{F - E_g + q\varphi^j(x)}{kT}} + N^{ion}(x) + N_s(x) \right), \end{aligned} \quad (9)$$

где h – шаг дискретизации, j – номер итерации.

Граничные условия для уравнения (9): $\varphi^j(-w_n - h) = \varphi^j(-w_n)$, $\varphi^j(w_p) = 0$. Начальное приближение для $j = 0$ является решением уравнения локальной нейтральности

$$N_v e^{\frac{-F - q\varphi^0(x)}{kT}} - N_c e^{\frac{F - E_g + q\varphi^0(x)}{kT}} + N^{ion}(x) + N_s(x) = 0. \quad (10)$$

Значения $\varphi^j(x_i)$ являются решением алгебраических уравнений (9), которые решались численно методом биекций в каждой точке отрезка интегрирования $x_i = -w_n + i \cdot h$, $i = 0, 1, \dots, K - 1$, $K = (w_p + w_n)/h$, используя $\varphi^{j-1}(x_i)$. Итерационный процесс прекращается при достижении условия (6).

Результаты моделирования и их обсуждение. Объект моделирования – n - p переход в кремнии, созданный диффузией фосфора в подложку, легированную бором. Параметры распределения концентрации примесей: $N_{D0} = 10^{26} \text{ м}^{-3}$, $N_A = 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Глубина залегания диффузионного n - p перехода $w_n = 0.45 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, n - p переход является достаточно плавным, чтобы уменьшить размер области, обогащенной электронами, в области пространственного заряда (ОПЗ) [17].

Поверхностные состояния существуют как нарушения трансляционной симметрии кристалла – таммовские поверхностные уровни, поверхностные состояния типа Шокли, состояния, обусловленные дефектами кристаллической решетки и примесными атомами. В зависимости от способа обработки поверхности [18], облучения ионизирующими час-

тицами [19], состава атмосферы и других факторов плотность поверхностных электронных состояний принимает значения $10^{15} \div 10^{19} \text{ м}^{-2}$, толщина поверхностного слоя в кремнии $\sim 2 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ [20].

На рис. 2 показаны рассчитанные численно зависимости потенциала и напряженности электрического поля в n - p переходе в кремнии при отсутствии поверхностных состояний, $T = 300 \text{ К}$. Рассчитанные в этом случае зависимости $n(x)$, $p(x)$ и $N^{ion}(x)$ показаны на рис. 3.

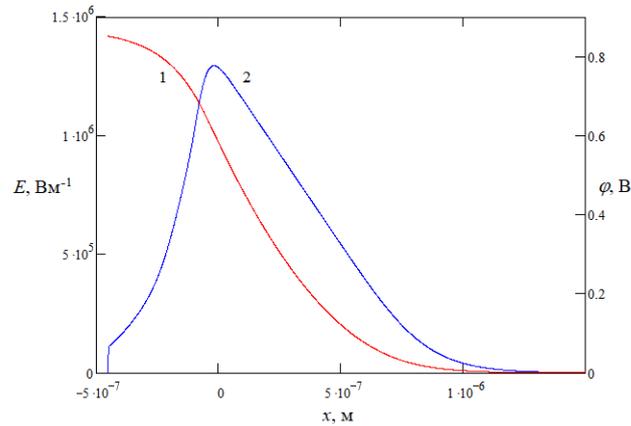


Рис. 2. Электрическое поле диффузионного n - p перехода:
1 – потенциал $\varphi(x)$, 2 – напряженность $E(x)$

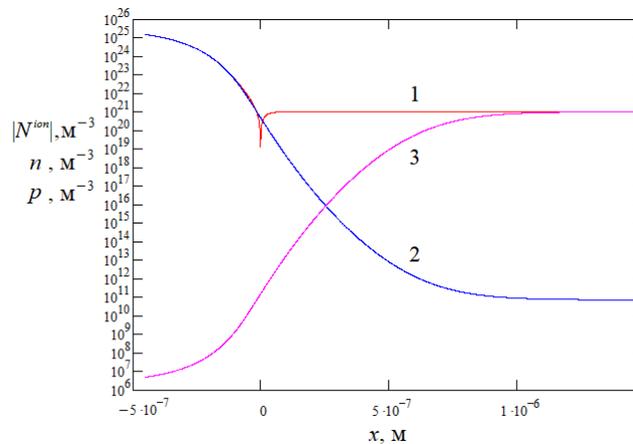


Рис. 3. Концентрации заряженных частиц: 1 – ионизированных примесей (по модулю) $|N^{ion}(x)|$, 2 – электронов $n(x)$, 3 – дырок $p(x)$

Концентрация ионизированных доноров $N^{ion} = 1.46 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ при $x = -w_n$ (рис. 3), $N^{ion} < N_c = 2.74 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$, $N_A \ll N_v$, следовательно, электроны и дырки не являются вырожденными. ООЗ, где $n(x), p(x) \ll |N^{ion}(x)|$, расположена при $0 < x < 0.75 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Изменение $\varphi(x)$ в ООЗ равновесного n - p перехода составляет $V_0 = 0.6 \text{ В}$. Часть ОПЗ, содержащая положительную плотность заряда, начинается на поверхности $x = -w_n$ и простирается вплоть до металлургической границы $x = 0$. В этой области $n(x)$ меньше, но порядка $N^{ion}(x)$, поэтому последовательное сопротивление n слоя много меньше, чем p слоя.

В эмиттере n -типа поверхностные состояния в запрещенной зоне, расположенные ниже уровня Ферми, заряжены отрицательно, поэтому в формуле (4) $N_{surf} < 0$. В эмиттере p -типа $N_{surf} > 0$. На рис. 4 продемонстрировано влияние знака поверхностного заряда на изменение $E(x)$ в эмиттере n -типа. В расчетах использованы следующие значения параметров формулы (4) $|N_{surf}| = 10^{25} \text{ м}^{-3}$ $w_{surf} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ м}$, так что плотность поверхностных состояний $|N_{ss}| = 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

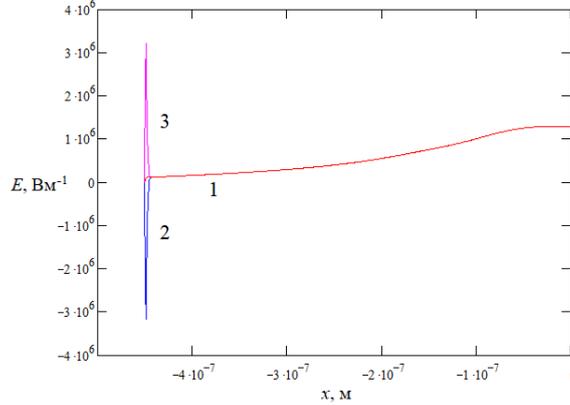


Рис. 4. Напряженность электрического поля $E(x)$ в эмиттере: 1 – $N_{ss} = 0$,
2 – $N_{ss} = -10^{16} \text{ м}^{-2}$, 3 – $N_{ss} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$

Условие $N_{ss} = 0$ соответствует отсутствию поверхностных состояний, $N_{ss} = -10^{16} \text{ м}^{-2}$ – наличию отрицательно заряженных состояний ниже уровня Ферми на поверхности эмиттера n -типа, $N_{ss} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$ – дополнительно созданному положительному заряду на поверхности.

Определим влияние знака поверхностного заряда на рекомбинационные свойства поверхности. Используем приближенное решение системы уравнений транспорта носителей заряда. В случае низкой инжекции носителей заряда для концентрации избыточных электронов δn и дырок δp в эмиттере выполняются условия $n_0 \gg \delta n \sim \delta p$, $n_0 \gg p_0$, $p = p_0 + \delta p$, где n_0, p_0 – концентрации равновесных электронов и дырок. Поток дырок

$$j_p(x) \approx \mu_p(x)E(x)\delta p(x) - D_p(x)\frac{d}{dx}\delta p(x), \quad (11)$$

где μ_p – подвижность дырок, D_p – коэффициент диффузии дырок.

$$\frac{d}{dx}j_p(x) = -\frac{\delta p(x)}{\tau_p(x)}, \quad (12)$$

где τ_p – время жизни дырок.

Размер ОПЗ поверхностного слоя $w_{ch} \approx 5 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ (рис. 4). Проинтегрируем уравнение (12) в тонком поверхностном слое – $w_n \leq x \leq -w_n + w_{ch}$,

$$\frac{1}{w_{ch}}(j_p(-w_n + w_{ch}) - j_p(-w_n)) \approx -\frac{\overline{\delta p}}{\tau_{ps}}, \quad (13)$$

где $\overline{\delta p}$ – среднее значение концентрации избыточных дырок в ОПЗ поверхностного слоя, τ_{ps} – эффективное время жизни дырок. На свободной поверхности $j_p(-w_n) \approx 0$. Из (13) следует условие на границе $x = -w_n + w_{ch}$

$$j_p(-w_n + w_{ch}) \approx -S\bar{\delta p}, \quad (14)$$

где $S \approx w_{ch}\tau_{ps}^{-1}$ – скорость поверхностной рекомбинации.

Зависимость $E(x)$ в поверхностном слое принимает экстремальное значение E_{ex} при $x = -w_n + w_{ex}$, $w_{ex} \approx 1.4 \cdot 10^{-9}$ м (рис. 4).

$$j_p(-w_n + w_{ex}) \approx \mu_{ps}E_{ex}\bar{\delta p} - D_{ps}\frac{\delta p(-w_n + w_{ch}) - \bar{\delta p}}{w_{ch} - w_{ex}}, \quad (15)$$

где μ_{ps} , D_{ps} – средние значения подвижности и коэффициента диффузии дырок в ОПЗ поверхностного слоя. Из (12) и (15) получим

$$j_p(-w_n + w_{ex}) - j_p(-w_n) \approx \mu_{ps}E_{ex}\bar{\delta p} - D_{ps}\frac{\delta p(-w_n + w_{ch}) - \bar{\delta p}}{w_{ch} - w_{ex}} = -w_{ex}\frac{\bar{\delta p}}{\tau_{ps}},$$

откуда найдем

$$\bar{\delta p} \approx \frac{\delta p(-w_n + w_{ch})}{\left(1 + \frac{(w_{ch} - w_{ex})qE_{ex}}{kT} + \frac{w_{ex}(w_{ch} - w_{ex})}{D_{ps}\tau_{ps}}\right)}. \quad (16)$$

Из (14) и (16) следует рекомбинационное условие на поверхности эмиттера

$$j_p(-w_n + w_{ch}) \approx -S_{ef}\bar{\delta p}(-w_n + w_{ch}), \quad (17)$$

$$S_{ef} \approx \frac{S}{\left(1 + \frac{(w_{ch} - w_{ex})qE_{ex}}{kT} + \frac{w_{ex}(w_{ch} - w_{ex})}{L_{ps}^2}\right)},$$

где S_{ef} – эффективная скорость поверхностной рекомбинации, $L_{ps} = \sqrt{D_{ps}\tau_{ps}}$.

Решая уравнения (11) и (12) относительно $\delta p(x)$, учтем, что $w_n \gg w_{ch}$, тогда (17) является краевым условием при $x = -w_n$ для решения диффузионно-дрейфового уравнения в эмиттере.

Рассмотрим три случая, представленные на рис. 4.

$$1. N_{ss} = 0, E_{ex} = 0, w_{ch} = w_{surf}, w_{ex} = 0, S_{ef} = S \sim 10^3 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}.$$

$$2. N_{ss} = -10^{16} \text{ м}^{-2}, E_{ex} = -3.2 \cdot 10^6 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}, S_{ef} \approx 1.8 \cdot S.$$

$$3. N_{ss} = 10^{16} \text{ м}^{-2}, E_{ex} = 3.2 \cdot 10^6 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}, S_{ef} \approx 0.7 \cdot S \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}.$$

Выводы. Предложен численный метод решения уравнения Пуассона для электрического потенциала в n - p переходе с граничными условиями, обеспечивающими общую электронейтральность.

Распределение электрического поля в диффузионном n - p переходе рассчитано с учетом плотности электронных состояний в запрещенной зоне в поверхностной области эмиттера. Значение плотности поверхностных состояний ограничено так, что инверсия типа проводимости на поверхности не возникает. Максимальное значение модуля напряжённости электрического поля в поверхностной области превышает аналогичное значение в n - p переходе в три раза и более.

В теоретических моделях фотоэлектрических преобразователей влияние поверхностных состояний на вольтамперную характеристику учитывается посредством скорости поверхностной рекомбинации. Результаты расчетов показывают, что вследствие сущест-

ования электронных состояний в запрещенной зоне на поверхности эмиттера напряженность электрического поля направляет неосновные носители заряда к поверхности, увеличивая эффективную скорость поверхностной рекомбинации. Для компенсации этого эффекта необходимо в 10 раз уменьшить плотность поверхностных состояний за счет пассивации или изменить знак поверхностного заряда на противоположный, используя технологию подлегирования или имплантации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кондратенко В.С., Куроедов А.В., Рыжиков И.В. Метод неразрушающего контроля надежности PIN фотодиодов по вольт-амперным характеристикам // Прикладная физика. – 2010. – № 2. – С. 67-73.
2. Артамонов А.В., Астахов В.П., Карпов В.В., Чижко В.Ф., Левшин В.Л. Расчет фотоэлектрических характеристик фотодиодных матричных фотоприемных устройств спектрального диапазона 2,0–3,5 мкм на основе арсенида индия // Прикладная физика. – 2011. – № 6. – С. 145-148.
3. Трегулов В.В., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В. Механизмы токопрохождения в полупроводниковой структуре фотоэлектрического преобразователя с n^+ - p -переходом и антиотражающей пленкой пористого кремния, сформированной методом окрашивающего травления // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89, В. 5. – С. 737-743.
4. Mohammed A. P-N Junction // Technical Report. – 2020. – 19 p.
5. Pulfrey D.L. Understanding Modern Transistors and Diodes. – Cambridge: Cambridge University Press, 2010. – 355 p.
6. Богатов Н.М., Корнеев А.И., Матвеекин М.П., Родоманов Р.Р. Исследование влияния неравновесного заряда границы SiO_2 -Si на динамику спектральной чувствительности солнечных элементов с субмикронным p - n -переходом // Известия высших учебных заведений Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2006. – № 2. – С. 52-54.
7. Богатов Н.М., Матвеекин М.П., Першин Н.В., Родоманов Р.Р. Определение времени захвата неравновесного поверхностного заряда в полупроводниковых структурах по спаду тока короткого замыкания // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2008. – № 6. – С. 39-41.
8. Симашикевич А.В., Шербан Д.А., Брук Л.И., Фёдоров В.М., Коваль А., Усатый Ю.В. Особенности механизма прохождения тока через изотипную структуру ИТО/nSI // Электронная обработка материалов. – 2010. – № 1. – С. 44-47.
9. Deng S., Xu R., Li M., Li L., Wang Z.L., Zhang Q. Influences of surface charges and gap width between p -type and n -type semiconductors on charge pumping // Nano Energy. – 2020. – Vol. 78, 105287. – P. 1-7.
10. Мельник Н.Н., Трегулов В.В., Скопцова Г.Н., Иванов А.И., Косцов Д.С. Свойства p - n -перехода, сформированного в пленке пористого кремния, выращенной металл-стимулированным травлением // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2022. – № 9. – С. 3-10.
11. Papež V., Hájek J., Kojecký V. Influence of surface states on the reverse and noise properties of silicon power diodes // IET Circuits Devices Syst. – 2014. Vol. 8, Issue 3. – P. 213-220.
12. Данилкин Е.А., Старченко А.В., Каратаева Е.А., Юмин К.В., Дель И.В., Смиян Н.С., Лецинский Д.В. Параллельная реализация некоторых итерационных методов для решения системы линейных алгебраических уравнений в мезомасштабной метеорологической модели атмосферного пограничного слоя // Десятая Сибирская конференция по параллельным и высокопроизводительным вычислениям: Сб. статей. Томск, 5–7 октября 2021 г. – Томск: Изд-во НТЛ, 2021. – С. 18-28.
13. Кенжебек Е.Г., Иманкулов Т.С., Ахмед-Заки Д.Ж. Параллельный алгоритм решения уравнения Пуассона на основе технологии MPI+OPENMP // Проблемы оптимизации сложных систем: Матер. XIV Международной Азиатской школы-семинара. Алматы, 20–31 июля 2018 г. – Алматы: Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК, 2018. – С. 307-315.
14. Мингалев О.В., Мельник М.Н. Численное решение краевых задач для уравнения Пуассона методом быстрого преобразования Фурье с использованием параллельных вычислений // Тр. Кольского научного центра РАН. – 2018. – Т. 9, В. 5. – С. 165-182.
15. Мерер Х. Диффузия в твердых телах. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. – 536 с.
16. Шалимова К.В. Физика полупроводников. – М.: Лань, 2010. – 400 с.
17. Богатов Н.М. Распределение заряда в резком несимметричном равновесном n - p -переходе // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2016. – № 3. – С. 12-17.

18. Яфаров Р.К. Влияние встроенного поверхностного потенциала на ВАХ кремниевых МДП структур // Микроэлектроника. 2019. Т. 48, № 2. – С. 155-159.
19. Александров О.В. Влияние интенсивности ионизирующего облучения на отклик МОП-структур // Физика и техника полупроводников. – 2021. – Т. 55, В. 2. – С. 152-158.
20. Юров В.М., Жанабергенов Т., Гученко С.А. Толщина поверхностного слоя типичных полупроводников // The scientific heritage. – 2020. – No. 43. – P. 20-23.

REFERENCES

1. Kondratenko V.S., Kuroedov A.V., Ryzhikov I.V. Metod nerazrushayushchego kontrolya nadezhnosti PIN fotodiodov po vol't-ampernym kharakteristikam [Method of non-destructive testing of the reliability of PIN photodiodes based on current-voltage characteristics], *Prikladnaya fizika [Applied Physics]*, 2010, No. 2, pp. 67-73.
2. Artamonov A.V., Astakhov V.P., Karpov V.V., Chishko V.F., Levshin V.L. Raschet fotoelektricheskikh kharakteristik fotodiodnykh matrichnykh fotopriemnykh ustroystv spektral'nogo diapazona 2,0–3,5 mkm na osnove arsenida indiya [Calculation of photoelectric characteristics of photodiode matrix photodetector devices of the spectral range 2.0–3.5 microns based on indium arsenide], *Prikladnaya fizika [Applied Physics]*, 2011, No. 6, pp. 145-148.
3. Tregulov V.V., Litvinov V.G., Ermachikhin A.V. Mekhanizmy tokoprokhozhdeniya v poluprovodnikovoy strukture fotoelektricheskogo preobrazovatelya s n⁺-p-perekhodom i antiotrazhayushchey plenкой poristogo kremniya, sformirovannoy metodom okrashivayushchego travleniya [Mechanisms of current flow in the semiconductor structure of a photoelectric converter with an n⁺-p junction and an anti-reflection film of porous silicon formed by color etching], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Journal of Technical Physics]*, 2019, Vol. 89, V. 5, pp. 737-743.
4. Mohammed A. P-N Junction, *Technical Report*, 2020, 19 p.
5. Pulfrey D.L. Understanding Modern Transistors and Diodes. Cambridge: Cambridge University Press, 2010, 355 p.
6. Bogatov N.M., Korneev A.I., Matveyakin M.P., Rodomanov R.R. Issledovanie vliyaniya neravnovesnogo zaryada granitsy SiO₂-Si na dinamiku spektral'noy chuvstvitel'nosti solnechnykh elementov s submikronnym p-n-perekhodom [Study of the influence of the nonequilibrium charge of the SiO₂-Si boundary on the dynamics of the spectral sensitivity of solar cells with a submicron p-n junction], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskije nauki [News of higher educational institutions of the North Caucasus region. Technical science]*, 2006, No. 2, pp. 52-54.
7. Bogatov N.M., Matveyakin M.P., Pershin N.V., Rodomanov R.R. Opredelenie vremeni zakhvata neravnovesnogo poverkhnostnogo zaryada v poluprovodnikovykh strukturakh po spadу toka korotkogo zamykaniya [Determination of the time of capture of a nonequilibrium surface charge in semiconductor structures by the decline in short-circuit current], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki [News of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural Sciences]*, 2008, No. 6, pp. 39-41.
8. Simashkevich A.V., Sherban D.A., Bruk L.I., Fedorov V.M., Koval' A., Usaty Yu.V. Osobennosti mekhanizma prokhozhdeniya toka cherez izotipnyuyu strukturu ITO/nSI [Features of the mechanism of current passage through the isotope ITO/nSI structure], *Elektronnaya obrabotka materialov [Electronic processing of materials]*, 2010, No. 1, pp. 44-47.
9. Deng S., Xu R., Li M., Li L., Wang Z.L., Zhang Q. Influences of surface charges and gap width between p-type and n-type semiconductors on charge pumping, *Nano Energy*, 2020, Vol. 78, 105287, pp. 1-7.
10. Mel'nik N.N., Tregulov V.V., Skoptsova G.N., Ivanov A I., Kostsov D.S. Svoystva p-n-perekhoda, sformirovannogo v plenke poristogo kremniya, vyrashchennoy metall-stimulirovannym travleniem [Properties of a p-n junction formed in a porous silicon film grown by metal-stimulated etching], *Kratkie soobshcheniya po fizike FIAN [Brief communications on physics of the Lebedev Physical Institute]*, 2022, No. 9, pp. 3-10.
11. Papež V., Hájek J., Kojecký B. Influence of surface states on the reverse and noise properties of silicon power diodes, *IET Circuits Devices Syst.*, 2014, Vol. 8, Issue 3, pp. 213-220.
12. Danilkin E.A., Starchenko A.V., Karataeva E.A., Yumin K.V., Del' I.V., Smiyan N.S., Leshchinskiy D.V. Parallelnaya realizatsiya nekotorykh iteratsionnykh metodov dlya resheniya sistemy lineynykh algebraicheskikh uravneniy v mezomasshtabnoy meteorologicheskoy modeli atmosfernogo pogrannichnogo sloya [Parallel implementation of some iterative methods for solving a system of linear algebraic equations in a mesoscale meteorological model of the atmospheric boundary layer], *Desyataya Sibirskaya konferentsiya po parallel'nym i vysokoproizvoditel'nyim vychisleniyam: Sb. statey. Tomsk, 5–7 oktyabrya 2021 g. [Tenth Siberian Conference on Parallel and High-Performance Computing: Proc. articles. Tomsk, October 5–7, 2021]*. Tomsk: Izd-vo NTL, 2021, pp. 18-28.

13. *Kenzhebek E.G., Imankulov T.S., Akhmed-Zaki D.Zh.* Parallelnyy algoritm resheniya uravneniya Puassona na osnove tekhnologii MPI+OPENMP [Parallel algorithm for solving the Poisson equation based on MPI+OPENMP technology], *Problemy optimizatsii slozhnykh sistem: Mater. XIV Mezhdunarodnoy Aziatskoy shkoly-seminara. Almaty, 20–31 iyulya 2018 g.* [Problems of optimization of complex systems: Proceedings of the XIV International Asian School-Seminar. Almaty, July 20–31, 2018]. Almaty: Institut informatsionnykh i vychislitel'nykh tekhnologiy MON RK, 2018, pp. 307-315.
14. *Mingalev O.V., Mel'nik M.N.* Chislennoe reshenie kraevykh zadach dlya uravneniya Puassona metodom bystrogo preobrazovaniya Fur'e s ispol'zovaniem parallelnykh vychisleniy [Numerical solution of boundary value problems for the Poisson equation by the fast Fourier transform method using parallel computing], *Tr. Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2018, Vol. 9, V. 5, pp. 165-182.
15. *Merer Kh.* Diffuziya v tverdykh telakh [Diffusion in solids]. Dolgoprudnyy: Izdatel'skiy dom «Intellekt», 2011, 536 p.
16. *Shalimova K.V.* Fizika poluprovodnikov [Physics of semiconductors]. Moscow: Lan', 2010, 400 p.
17. *Bogatov N.M.* Raspredelenie zaryada v rezkom nesimmetrichnom ravnesnom n-p-perekhode [Charge distribution in a sharp asymmetric equilibrium n-p junction], *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological bulletin of scientific centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2016, No. 3, pp. 12-17.
18. *Yafarov R.K.* Vliyanie vstroennogo poverkhnostnogo potentsiala na VAKh kremnievykh MDP struktur [The influence of the built-in surface potential on the current-voltage characteristics of silicon MIS structures], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 2019, Vol. 48, No. 2, pp. 155-159.
19. *Aleksandrov O.V.* Vliyanie intensivnosti ioniziruyushchego oblucheniya na otklik MOP-struktur [Influence of the intensity of ionizing radiation on the response of MOS structures], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and semiconductor technology], 2021, Vol. 55, V. 2, pp. 152-158.
20. *Yurov V.M., Zhanabergenov T., Guchenko S.A.* Tolshchina poverkhnostnogo sloya tipichnykh poluprovodnikov [Thickness of the surface layer of typical semiconductors], *The scientific heritage* [The scientific heritage], 2020, No. 43, pp. 20-23.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

Богатов Николай Маркович – Кубанский государственный университет; e-mail: bogatov@phys.kubsu.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: +79034513106; д.ф.-м.н.; профессор.

Володин Владимир Сергеевич – e-mail: volodinvs1995@mail.ru; тел.: +79898203672; аспирант.

Григорьян Леонтий Рустемович – e-mail: leonmezon@mail.ru; тел.: +79181681719; к.ф.-м.н.; доцент.

Коваленко Максим Сергеевич – e-mail: m.s.kovalenko@ya.ru; тел.: +79184694954; к.ф.-м.н.; доцент.

Bogatov Nikolay Markovich – Kuban State University; e-mail: bogatov@phys.kubsu.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79034513106; dr. of phys. and math.; professor.

Volodin Vladimir Sergeevich – e-mail: volodinvs1995@mail.ru; phone: +79898203672; graduate student.

Grigoryan Leontiy Rustemovich – e-mail: leonmezon@mail.ru; phone: +79181681719; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Kovalenko Maxim Sergeevich – e-mail: m.s.kovalenko@ya.ru; phone: +79184694954; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Р.Э. Косак, А.В. Геворкян

КОМПАКТНЫЙ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ВИВАЛЬДИ КАРДИОИДНОЙ ФОРМЫ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ИМПЕДАНСНЫМИ ВСТАВКАМИ

Представлена конструкция излучателя Вивальди кардиоидной формы с прямоугольными импедансными вставками по краям его металлизации. Исследовано влияние импедансных вставок от их расположения и параметров на характеристики излучателя. Приведены частотные характеристики коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН), коэффициента усиления (КУ), коэффициента полезного действия (КПД) и уровня кроссовой поляризации излучателя без импедансных вставок и с ними. Разработанный излучатель является электрически компактным (электрическая высота на верхней рабочей частоте равна $0,740 \lambda$, а на нижней – $0,127 \lambda$) и сверхширокополосным (СШП) с коэффициентом перекрытия (КП) $5,809:1$ в рабочей полосе частот $127,3\text{--}739,5$ МГц. Ширина импедансных вставок изменялась от $5,0$ мм до $25,5$ мм. При этом, увеличение ширины приводит к небольшому расширению рабочей полосы частот и увеличению КП. А вот КУ практически не изменяется, так как излучатель является слабонаправленным и его КУ зависит в основном от размера апертуры. Численные значения КПД и уровня кроссовой поляризации при увеличении ширины вставок также практически не изменяются. Оптимальное значение ширины импедансных вставок равно $25,5$ мм. Высота импедансных вставок отсчитывалась от верхней части излучателя. Рассмотрено влияние импедансных вставок высотой $60, 100, 140, 145$ и 160 мм. Определено, что с увеличением их высоты ширина рабочей полосы увеличивается, однако средний уровень КСВН в полосе частот $180\text{--}280$ МГц плавно растет. КУ, КПД и уровень кроссовой поляризации при увеличении высоты вставок также практически не изменяются. Оптимальное значение высоты импедансных вставок равно $25,5$ мм. Таким образом, введение импедансных вставок позволяет добиться расширения рабочей полосы частот излучателя.

Компактный излучатель Вивальди; коэффициент стоячей волны по напряжению; коэффициент усиления; коэффициент полезного действия; сверхширокая полоса частот; фазированная антенная решетка; импедансные вставки.

R.E. Kosak, A.V. Gevorkyan

COMPACT ULTRA-WIDEBAND CARDIOID VIVALDI RADIATOR WITH RECTANGULAR IMPEDANCE INSERTS

The paper presents the design of the cardioid-shaped Vivaldi radiator with rectangular impedance inserts along the edges of its metallization. The influence of impedance inserts, their location, and parameters on the characteristics of the radiator is investigated. The frequency characteristics of the voltage standing wave ratio (VSWR), realized gain, efficiency, and cross-polarization level of the radiator without and with impedance inserts are given. The developed radiator is electrically compact (electrical height at the upper operating frequency is equal to 0.740λ , and at the lower operating frequency is equal to 0.127λ) and ultra-wideband with an overlap ratio (OR) of $5.809:1$ in the operating frequency band $127.3\text{--}739.5$ MHz. The width of the impedance inserts varied from 5.0 mm to 25.5 mm towards the tapered slot. At the same time, an increase width leads to a slight expansion of the operating frequency band and an increase of OR. But the realized gain practically does not change since the radiator is weakly directional and its realized gain depends mainly on the size of the aperture. The numerical values of efficiency and cross-polarization characteristics also remained virtually unchanged with increasing insert width. The optimal width of the impedance inserts is equal to 25.5 mm. The height of the impedance inserts was measured from the top of the radiator. The influence of impedance inserts with a height of $60, 100, 140, 145,$ and 160 mm is considered. It has been determined that as their height increases, the width of the operating band increases, but the average VSWR level in the frequency band $180\text{--}280$ MHz gradually increases. The realized gain, efficiency, and cross-polarization level also remain virtually unchanged with the increasing height of the inserts. The optimal height of the impedance inserts is equal to 25.5 mm. Thus, the introduction of impedance inserts makes it possible to expand the operating frequency band of the radiator.

Compact Vivaldi radiator; VSWR; realized gain; efficiency; UWB; phased array antenna; impedance inserts.

Введение. На сегодняшний день существует много задач по разработке излучателей фазированных антенных решеток (ФАР), которые применяются в различных сферах: радиосвязь, радиолокация, радионавигация, радиоэлектронная борьба и т.д. Важно, чтобы ФАР имела требуемые характеристики излучения в широкой или сверхширокой полосе частот [1].

Существует несколько определений широкополосных и СШП сигналов [2]. Определим, что в данной работе сверхширокополосными будем считать ФАР с шириной рабочей полосы частот более октавы, т.е. ФАР, у которых верхняя рабочая частота более чем в 2 раза превосходит нижнюю ($KП \geq 2$) [3].

ФАР состоят из излучателей, которые должны обладать малой массой, компактным размером, быть недорогими и простыми в изготовлении и транспортировке. Всеми перечисленными ранее достоинствами обладают излучатели на основе антенны Вивальди [4].

Антенна Вивальди, впервые представленная Петером Гибсоном в 1979 году [5], с тех пор получила множество модификаций. На характеристики излучения этой антенны большую роль оказывают особенности ее конструкции: форма проводящих слоев, использование различных вырезов и вставок, которые являются импедансными структурами и т.д. Правильным выбором формы лепестков антенны можно добиться решения поставленных задач. Известно множество примеров построения различных форм излучателей Вивальди: скругленная, Чебышевская, эллиптическая и т.д. [6], в том числе конформные [7–8]. И каждая из этих форм имеет свои преимущества и недостатки.

К примеру, СШП антиподная антенна Вивальди кардиоидной формы была продемонстрирована в [9]. Однако антенна имела значительную электрическую высоту: на верхней рабочей частоте 15,000 ГГц равную $13,5 \lambda$, а на нижней рабочей частоте 3,658 ГГц равную $3,3 \lambda$.

О влиянии вставок различной формы, расположенных на краях излучателя Вивальди, на его характеристики излучения известно немало. К примеру, добавление прямоугольных вставок по краям излучателя позволяет расширить рабочую полосу частот [10], а введение сплошной пластины на кромке позволяет также улучшить средний уровень согласования [11].

Согласно [12], характеристики излучения излучателя в составе решетке зависят от параметров самого элемента. При этом, для их улучшения (в том числе для улучшения согласования) можно использовать различные импедансные поверхности. Так, в [13] для улучшения уровня согласования и полосы рабочих частот используются согласующие элементы в виде прямоугольных металлических пластин, расположенных по краям излучателя. Важную роль играет компактность излучателя, что позволяет сэкономить на материале, упростить производство и транспортировку, а также уменьшить вес ФАР. Миниатюризации антенн Вивальди и излучателей на их основе можно добиться благодаря изменению формы их лепестков [14].

В [15] импедансные вставки используются для увеличения усиления и улучшения ДН. Также импедансные вставки позволяют расширить рабочую полосу частот, улучшить согласование, КУ и направленность антенны Вивальди [16–17].

Целью данной работы было исследование эффективности применения прямоугольных импедансных вставок по краям лепестков для расширения рабочей полосы частот компактного излучателя Вивальди кардиоидной формы.

Конструкция и характеристики излучения излучателя без импедансных вставок. В данной работе рассматривается излучатель Вивальди кардиоидной формы (рис. 1), структура которого основана на антенне из [9].

Излучатель выполнен на диэлектрической подложке «RT/duroid 5880» с относительной диэлектрической проницаемостью 2,2. Его габаритные размеры: толщина – 0,9 мм, ширина – 150,0 мм и высота – 300,0 мм. Излучатель располагается на экране размером 100 мм × 150 мм, который находится в плоскости XOY. Для построения кромки излучателя предложена следующая формула кардиоиды:

$$\begin{cases} x(t) = 0, \\ y(t) = \frac{0.5}{7} \cdot \cos(t), \\ z(t) = \frac{1}{9} \cdot (\sin(t) + \sqrt{|\cos(t)|}). \end{cases}$$

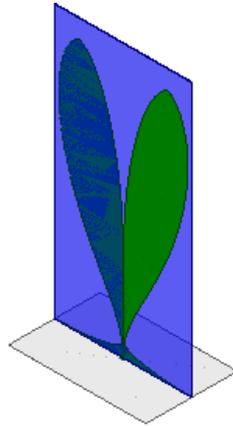


Рис. 1. Конструкция исходного излучателя кардиоидной формы

Излучатель рассчитывался в составе бесконечной антенной решетки с использованием периодических граничных условий на боковых поверхностях ячейки типа Master-Slave [18] в специализированном программном обеспечении электродинамического проектирования HFSS [19–20].

На рис. 2 приведены характеристики излучения КСВН, КУ, КПД и уровень кроссовой поляризации для излучателя, представленного на рис. 1.

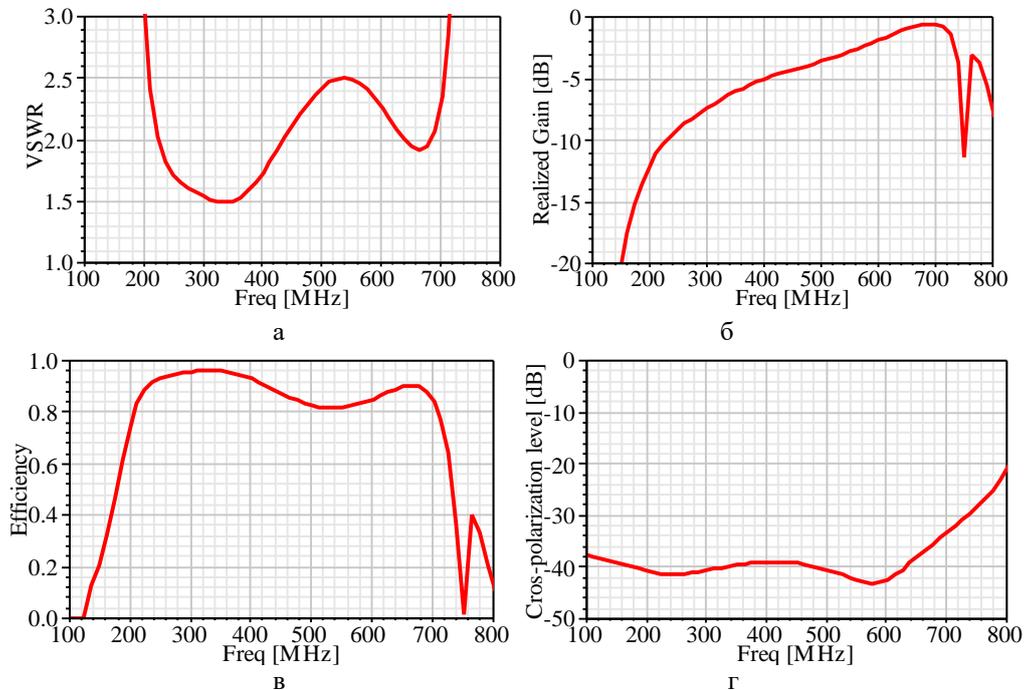


Рис. 2. Частотные характеристики КСВН (а), КУ (б), КПД (в) и уровня кроссовой поляризации (г) исходного излучателя

Из рис. 2,а видно, что рабочая полоса частот излучателя по уровню КСВН ≤ 3 находится в диапазоне от 201 до 715 МГц (КП = 3,557). При этом электрическая высота излучателя на верхней рабочей частоте равна $0,715 \lambda$, а на нижней – $0,201 \lambda$. Согласно рис. 2,б, в рабочей полосе частот излучателя значение реализованного коэффициента усиления находится в диапазоне от 11,88 до -0,57 дБ.

Из рис. 2,в видно, что в рабочей полосе частот излучателя значение КПД превышает 0,75, а из рис. 2,г видно, что в рабочей полосе частот значения уровня кроссовой поляризации в основном не превышают уровень 31 дБ. Следовательно, излучатель кардиоидной формы имеет линейную поляризацию с низким значением кроссовой поляризации.

Введение прямоугольных импедансных вставок по краям излучателя кардиоидной формы. Импедансные вставки расположены по краям верхней части излучателя (рис. 3). Отступ от края диэлектрической подложки до импедансных вставок составляет 1 мм.

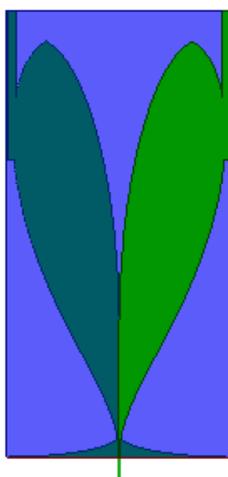


Рис. 3. Конструкция излучателя кардиоидной формы с импедансными вставками размером $5 \text{ мм} \times 100 \text{ мм}$

Исследование влияния ширины вставок W . Рассмотрим влияние импедансных вставок при изменении W в сторону раскрыва.

На рис. 4 приведены характеристики излучения КСВН, КУ, КПД и уровень кроссовой поляризации для излучателя из рис. 3 при следующих значениях их ширины: 5,0 мм (—), 10,0 мм (---), 15,0 мм (— —), 20,0 мм (.....) и 25,0 мм (— — —). В ходе дополнительного исследования выяснилось, что для достижения КП = 5 W необходимо увеличить до 25,5 мм (— — —). При этом высота вставок была принята равной 100 мм.

Согласно рис. 4,а, увеличение ширины вставок в сторону раскрыва приводит к небольшому расширению рабочей полосы частот и увеличению КП. Так, КП при ширине вставок 25,5 мм равен 5,091. Рабочая полоса частот при этом располагается в диапазоне 138,6–705,6 МГц. А вот КУ (рис. 4,б) практически не изменяется, так как излучатель является слабонаправленным и его КУ зависит в основном от размера апертуры.

Согласно рис. 4,в, в рабочей полосе частот излучателя значение КПД излучателя превышает 0,75 для ширины равной 25,5 мм. Значение частотной характеристики уровня кроссовой поляризации не превышает -26 дБ. По сравнению с излучателем из рис. 1 можно утверждать, что численные значения КПД и уровня кроссовой поляризации практически не изменились.

Дальнейшее увеличение размера вставок в сторону раскрыва приводит к уменьшению ширины щели и ухудшению характеристик излучения.

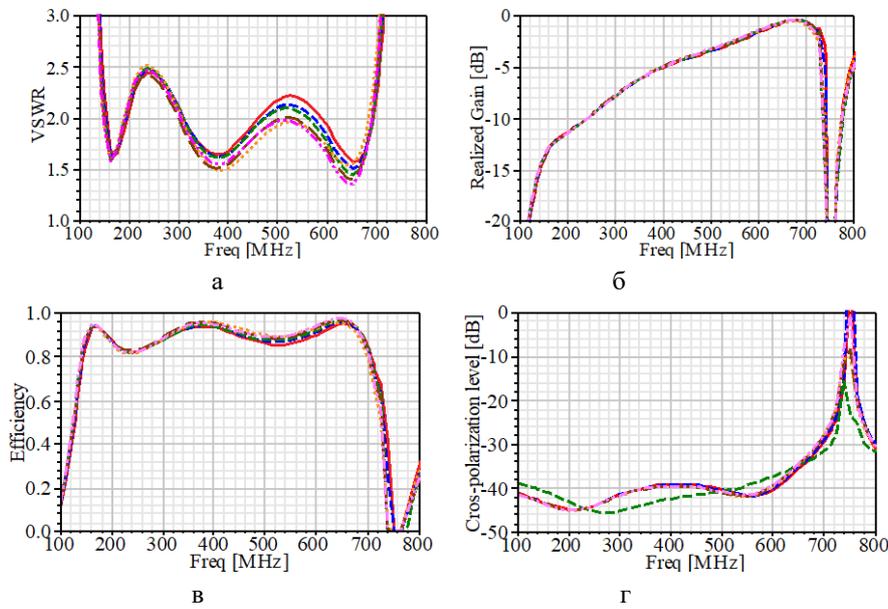


Рис. 4. Частотные характеристика КСВН (а), КУ (б), КПД (в) и уровня кроссовой поляризации (г) излучателя кардиоидной формы с увеличением ширины вставок в сторону раскрыва

Исследование влияния высоты вставок L при ширине 25,5 мм. Рассмотрим влияние изменения высоты (отсчитывается от верхней части излучателя) импедансных вставок L оптимальной ширины 25,5 мм на характеристики излучателя. Рассчитанные частотные характеристики КСВН, КУ, КПД и уровня кроссовой поляризации представлены на рис. 5. Они приведены для следующих значений L : 60 мм (—), 100 мм (---), 140 мм (—), 145 мм (---) и 160 мм (—).

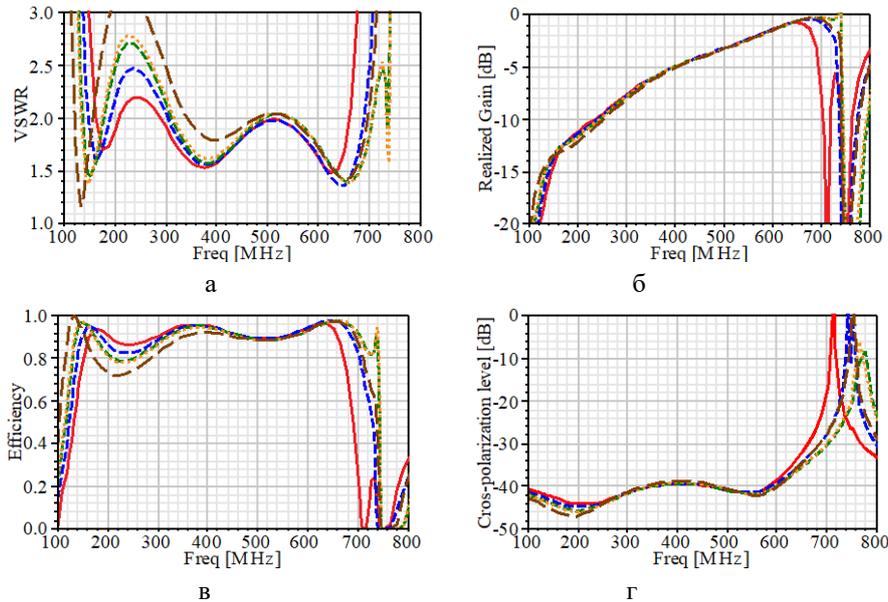


Рис. 5. Частотная характеристика КСВН (а), КУ (б), КПД (в) и уровня кроссовой поляризации (г) излучателя кардиоидной формы с увеличением высоты вставок при ширине 25,5 мм

Согласно рис. 5, с увеличением L ширина рабочей полосы частот увеличивается. При $L = 60$ мм рабочая полоса находится в диапазоне частот 149,8-673,8 МГц (КП равен 4,498), а при $L = 145$ мм – от 127,3 до 739,5 МГц (КП равен 5,809). Однако средний уровень КСВН в полосе частот 180–280 МГц плавно растет. КУ в рабочей полосе частот практически не изменяется. Увеличение высоты до 160 мм приводит к плавному уменьшению верхней рабочей частоты и уменьшению КП, а также превышению КСВН уровня КСВН = 3 в полосе 180–280 МГц, что также сужает рабочую полосу частот.

КПД, как и ранее, превышает 0,75. Высота вставок практически не влияет на значение уровня кроссовой поляризации за исключением частот более 650 МГц, где изменение высоты вставки влияет на верхнюю рабочую частоту. При этом при оптимальной высоте, равной 145 мм, уровень кроссовой поляризации не превышает -22 дБ, а на частотах менее 650 МГц – уровень -34 дБ.

Сравнение характеристик излучения исходного излучателя с излучателем с импедансными прямоугольными вставками оптимальных размеров. На рис. 6 представлена конструкция оптимального излучателя Вивальди кардиоидной формы с двумя прямоугольными импедансными вставками, расположенными в верхней части его лепестков. Размер вставок: $25,5 \times 145,0$ мм.

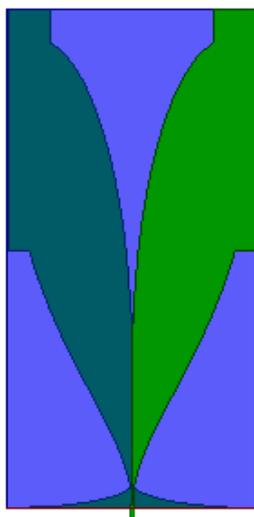


Рис. 6. Конструкция оптимального излучателя кардиоидной формы с импедансными вставками

На рис. 7 приведено сравнение частотных характеристик КСВН, КУ, КПД и уровня кроссовой поляризации для излучателя без импедансных вставок (—) и с ними (---).

Из рис. 7,а видно, что благодаря импедансным вставкам удалось уменьшить нижнюю рабочую частоту на 73,7 МГц (до 127,3 МГц) и увеличить верхнюю – на 24,5 МГц (до 739,5 МГц). Т. е. она расширилась почти на 100 МГц, а КП вырос с 3,557 до 5,809. Из рис. 7,б следует, что, благодаря улучшению КСВН, на частотах менее 200 МГц произошло увеличение КУ, что также отразилось и на изменении значений КПД (рис. 7,в). Наличие импедансных вставок, как это видно из рис. 7,г, существенно влияет на уровень кроссовой поляризации только в районе верхней рабочей частоты. Однако, как уже было отмечено ранее, на частотах менее 650 МГц, это влияние незначительно.

Также необходимо отметить, что разработанный излучатель с импедансными вставками является электрически компактным. Электрическая высота разработанного излучателя с импедансными вставками составляет $0,740 \lambda$ на верхней рабочей частоте 739,5 МГц и $0,127 \lambda$ на нижней рабочей частоте 127,3 МГц.

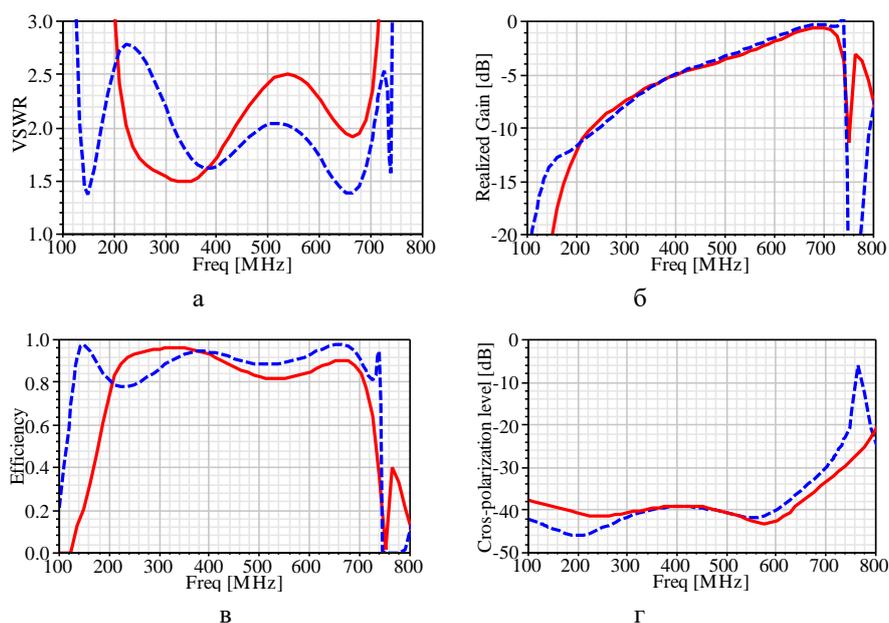


Рис. 7. Частотная характеристика КСВН (а), КУ (б), КПД (в) и уровня кроссовой поляризации (г) излучателя кардиоидной формы без импедансных вставок (—) и с импедансными вставками (---)

Выводы. Анализ результатов исследований показывает, что введение импедансных вставок прямоугольной формы позволяет существенно расширить рабочую полосу частот излучателя. Так, рабочая полоса частот излучателя без вставок располагалась в диапазоне от 201 до 715 МГц (КП = 3,557). Введение импедансных вставок шириной 25,5 мм и высотой 145 мм позволило уменьшить нижнюю рабочую частоту излучателя на 73,7 МГц (до 127,3 МГц) и увеличить верхнюю – на 24,5 МГц (до 739,5 МГц). Т.е. она расширяется почти на 100 МГц, а КП увеличивается с 3,557 до 5,809.

Таким образом, разработанный излучатель является сверхширокополосным с коэффициентом перекрытия 5,809:1 и электрически компактным с электрической высотой на верхней рабочей частоте равной $0,740 \lambda$, а на нижней – $0,127 \lambda$, а также обеспечивает работу ФАР в диапазоне 127,3–739,5 МГц.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда №РНФ/22-29-РТ (соглашение №22-19-00537, 12.05.2022, <https://rscf.ru/project/22-19-00537/>) в Центре коллективного пользования «Прикладная электродинамика и антенные измерения» Южного федерального университета, г. Таганрог.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. – 2-е изд. – М.: Техносфера, 2012. – 560 с.
2. Лазоренко О.Ф., Черногор Л.Ф. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2008. – №2. – С. 166-194.
3. Чубинский Н.П., Кирьяшкин В.В., Хи Н.К. Об использовании сверхширокополосных сигналов для идентификации радиолокационных объектов // Журнал Радиоэлектроники. – 2010. – № 5. – С. 1-13.
4. Latha T., Ram G., Kumar G. A., Chakravarthy M. Review on Ultra-Wideband Phased Array Antennas // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 129742-129755.
5. Gibson P.J. The Vivaldi aerial // Proc. 9th European Microwave Conference. – 1979. – P. 101-105.
6. Dixit A.S., Kumar S. A Survey of Performance Enhancement Techniques of Antipodal Vivaldi Antenna // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 45774-45796.

7. *Gevorkyan A.V., Yukhanov Y.V., Privalova T.Y.* The radiation characteristics of the Vivaldi antenna located on a cylindrical surface // 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL). – 2017. – P. 1780-1784.
8. *Gevorkyan A.V., Yukhanov Y.V., Privalova T.Y.* The Radiation Characteristics of the Four-Element Vivaldi Antenna Arrays, Which Located on the Cylindrical Surface // 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama). – 2018. – P. 1617-1620.
9. *Kosak R.E., Gevorkyan A.V.* UWB Cardioid-Shaped Vivaldi Antenna // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2023. – P. 228-231.
10. *Kosak R.E., Gevorkyan A.V.* Research of Ways to Improve Radiation Characteristics of Phased Array Radiator Based on Vivaldi Antenna // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2021. – P. 211-214.
11. *Косак Р.Э., Геворкян А.В., Юханов Ю.В.* Излучатель фазированной антенной решетки узкоугольного сканирования // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (КомТех-2022). – 2022. – С. 258-263.
12. *Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И.* Устройства СВЧ и антенны. – 2 изд. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.
13. *Геворкян А. В.* Сверхширокополосная антенна Вивальди с малым коэффициентом стоячей волны // Актуальные проблемы радиофизики: Сб. трудов VII Международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 34-37.
14. *Sahar Saleh, Mohd Haizal Jamaluddin, Farooq Razzaz, Saud M. Saeed, Nick Timmons, Jim Morrison* Compactness and performance enhancement techniques of ultra-wideband tapered slot antenna: A comprehensive review // Alexandria Engineering Journal. – 2023. – Vol. 74. – P. 195-229.
15. *Shi X., Cao Y., Hu Y., Luo X., Yang H. and Ye L.H.* A High-Gain Antipodal Vivaldi Antenna With Director and Metamaterial at 1–28 GHz // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2021. – Vol. 20, No. 12. – P. 2432-2436.
16. *Zhu S., Liu H. and Wen P.* A New Method for Achieving Miniaturization and Gain Enhancement of Vivaldi Antenna Array Based on Anisotropic Metasurface // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2019. – Vol. 67, No. 3. – P. 1952-1956.
17. *Zhou B. and Cui T.J.* Directivity Enhancement to Vivaldi Antennas Using Compactly Anisotropic Zero-Index Metamaterials // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2011. – Vol. 10. – P. 326-329.
18. *Хамед Е.А. Махьюб, Кисель Н.Н.* Оценка эффективности применения метаматериала в разработках микрополосковых антенн на основе LTCC-технологии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 3 (17). – С. 179-190.
19. *Банков С.Е., Курушин А.А.* Проектирование СВЧ устройств и антенн с Ansoft HFSS // Журнал Радиоэлектроники. – 2009. – № 5. – 736 с.
20. High Frequency Structural Simulator (HFSS) // ANSYS. – URL: www.ansys.com (дата обращения: 12.03.2024).

REFERENCES

1. *Khansen R.S.* Fazirovannye antennnye reshetki [Phased Array Antennas]. 2nd ed. Moscow: Tekhnosfera, 2012, 560 p.
2. *Lazorenko O.F., Chernogor L.F.* Sverkhshirokopolosnye signaly i fizicheskie protsessy [Ultra-wideband signals and physical processes], *Radiofizika i radioastronomiya* [Radio physics and radio astronomy], 2008, No. 2, pp. 166-194.
3. *Chubinskiy N.P., Kir'yashkin V.V., Khi N.K.* Ob ispol'zovanii sverkhshirokopolosnykh signalov dlya identifikatsii radiolokatsionnykh ob"ektov [On the use of ultra-wideband signals to identify radar objects], *Zhurnal Radioelektroniki* [Journal of Radioelectronics], 2010, No. 5, pp. 1-13.
4. *Latha T., Ram G., Kumar G. A., Chakravarthy M.* Review on Ultra-Wideband Phased Array Antennas, *IEEE Access*, 2021, Vol. 9, pp. 129742-129755.
5. *Gibson P.J.* The Vivaldi aerial, *Proc. 9th European Microwave Conference*, 1979, pp. 101-105.
6. *Dixit A.S., Kumar S.* A Survey of Performance Enhancement Techniques of Antipodal Vivaldi Antenna, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 45774-45796.
7. *Gevorkyan A.V., Yukhanov Y.V., Privalova T.Y.* The radiation characteristics of the Vivaldi antenna located on a cylindrical surface, *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL)*, 2017, pp. 1780-1784.
8. *Gevorkyan A.V., Yukhanov Y.V., Privalova T.Y.* The Radiation Characteristics of the Four-Element Vivaldi Antenna Arrays, Which Located on the Cylindrical Surface, *2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama)*, 2018, pp. 1617-1620.

9. Kosak R.E., Gevorkyan A.V. UWB Cardioid-Shaped Vivaldi Antenna, *2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, 2023, pp. 228-231.
10. Kosak R.E., Gevorkyan A.V. Research of Ways to Improve Radiation Characteristics of Phased Array Radiator Based on Vivaldi Antenna, *2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, 2021, pp. 211-214.
11. Kosak R.E., Gevorkyan A.V., Yukhanov Yu.V. Izluchatel' fazirovannoy antennoy reshetki uzkoougol'nogo skanirovaniya [Narrow-angle scanning phased array antenna radiator], *Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii (KomTekh-2022)* [Computer and information technologies in science, engineering and management (KomTech-2022)], 2022, pp. 258-263.
12. Voskresenskiy D.I., Gostyukhin V.L., Maksimov V.M., Ponomarev L.I. Ustroystva SVCh i anteny [Microwave devices and antennas]. 2nd ed. Moscow: Radiotekhnika, 2006, 376 p.
13. Gevorkyan A.V. Sverkhshirokopolosnaya antenna Vival'di s malym koeffitsientom stoyachey volny [Ultra-wideband Vivaldi antenna with low standing wave ratio], *Aktual'nye problemy radiofiziki: Sb. trudov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Current problems of radiophysics: Collection of proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference], 2017, pp. 34-37.
14. Sahar Saleh, Mohd Haizal Jamaluddin, Farooq Razzaz, Saud M. Saeed, Nick Timmons, Jim Morrison Compactness and performance enhancement techniques of ultra-wideband tapered slot antenna: A comprehensive review, *Alexandria Engineering Journal*, 2023, Vol. 74, pp. 195-229.
15. Shi X., Cao Y., Hu Y., Luo X., Yang H. and Ye L.H. A High-Gain Antipodal Vivaldi Antenna With Director and Metamaterial at 1–28 GHz, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, Vol. 20, No. 12, pp. 2432-2436.
16. Zhu S., Liu H. and Wen P. A New Method for Achieving Miniaturization and Gain Enhancement of Vivaldi Antenna Array Based on Anisotropic Metasurface, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, Vol. 67, No. 3, pp. 1952-1956.
17. Zhou B. and Cui T.J. Directivity Enhancement to Vivaldi Antennas Using Compactly Anisotropic Zero-Index Metamaterials, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, Vol. 10, pp. 326-329.
18. Khamed E.A. Makh'yub, Kisel' N.N. Otsenka effektivnosti primeneniya metamateriala v razrabotkakh mikropoloskovykh anten na osnove LTCC-tekhnologii [Evaluation of the metamaterial application efficiency in the development of microstrip antennas based on LTCC technology], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 3 (17), pp. 179-190.
19. Bankov S.E., Kurushin A.A. Proektirovaniye SVCh ustroystv i anten s Ansoft HFSS [Designing microwave devices and antennas with Ansoft HFSS], *Zhurnal Radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2009, No. 5, 736 p.
20. High Frequency Structural Simulator (HFSS), ANSYS. Available at: URL: www.ansys.com (accessed 12 March 2024).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.И. Турулин.

Косак Роман Эдуардович – Южный федеральный университет; e-mail: kosak@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371733; кафедра АиРПУ; аспирант; зав. лабораторией.

Геворкян Армен Валерьевич – e-mail: airpu@tgn.sfedu.ru; кафедра АиРПУ; к.т.н.; доцент.

Kosak Roman Eduardovich – Southern Federal University; e-mail: kosak@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371733; the Department of Antennas and Radiotransmitting Devices; postgraduate student; head of the laboratory.

Gevorkyan Armen Valerievich – e-mail: airpu@tgn.sfedu.ru; the Department of Antennas and Radiotransmitting Devices; cand. of eng. sc.; associate professor.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

1. Объем статьи должен быть не менее 12 и не более 18 страниц. Формат (А 4). Редактор *Word 7 for Windows*, шрифт Times New Roman, размер 14, интервал 1,5. Авторы представляют в редакцию 1 экз. статьи и идентичный электронный вариант.

2. Названию статьи предшествует индекс УДК, соответствующий заявленной теме.

3. Текст статьи начинается с названия статьи (на русском и английском языках), фамилии, имени и отчества автора (полностью) и снабжается аннотацией на русском и английском языках объемом *не менее 250-300 слов*. В тексте аннотации указывается цель, задачи исследования и краткие выводы. В аннотации *не следует* давать ссылки на номер публикации в списке литературы к статье. После аннотаций приводятся ключевые слова (словосочетания), несущие в тексте основную смысловую нагрузку (на русском и английском языках).

4. В тексте статьи следует использовать минимальное количество таблиц и иллюстраций. Рисунок должен иметь объяснения значений всех компонентов, порядковый номер, название, расположенное под рисунком. В тексте на рисунок дается ссылка. Таблица должна иметь порядковый номер, заголовок, расположенный над ней. Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст. Формулы должны быть набраны *в редакторе формул Word 7 for Windows*.

5. Цитаты тщательно сверяются с первоисточником и визируются автором на обратной стороне последней страницы: "Цитаты и фактический материал сверены". Подпись, дата.

6. Наличие пристатейного библиографического списка на русском и английском языках обязательно. *Ссылок должно быть не менее 20-ти*, из них на зарубежные источники – не менее 35 %. В тексте ссылки должны быть в квадратных скобках.

Примеры оформления литературы: а) для книг: фамилия, инициалы автора(ов), полное название книги, место, год издания, страницы; б) для статей: фамилия и инициалы автора(ов), полное название сборника, книги, газеты, журнала, где опубликована статья, место и год издания (сборника, книги), номер (для журнала), год и дата (для газеты), выпуск, часть (для сборника), страницы, на которых опубликована статья. Иностранная литература оформляется по тем же правилам.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Рукопись должна быть тщательно вычитана. Редакционная коллегия оставляет за собой право при необходимости сокращать статьи, редактировать и отсылать авторам на доработку.

8. Статьи сопровождаются сведениями об авторе(ах) (фамилия, имя, отчество, ученое звание, должность, место работы, адрес, электронный адрес и номер телефона) на русском и английском языках.

9. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Адрес журнала в Интернете: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.