



Российский
центр научной
информации

Вестник Российского фонда фундаментальных исследований

№ 1 (121) январь–март 2024 года

Основан в 1994 году

Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, рег. № 012620 от 03.06.1994

Сетевая версия зарегистрирована Роскомнадзором, рег. № ФС77-61404 от 10.04.2015

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Российский фонд фундаментальных исследований»

Главный редактор В.Я. Панченко,
заместители главного редактора В.В. Квардаков и В.Н. Фридлянов

Редакционная коллегия:

В.П. Анаников, В.Б. Бетелин, К.Е. Дегтярев, И.Л. Еременко,
П.К. Кашкаров, В.П. Матвеев, Е.И. Моисеев, А.С. Сигов,
В.А. Ткачук, Р.В. Петров, Д.Р. Хохлов

Редакция:

Е.Б. Дубкова, И.А. Мосичева

Адрес редакции:

119334, г. Москва, Ленинский проспект, 32а

Тел.: (499) 995-16-05

e-mail: pressa@rfbr.ru



Russian Centre
for Scientific
Information

Russian Foundation for Basic Research Journal

N 1 (121) January–March 2024

Founded in 1994

Registered by the Committee of the Russian Federation for Printed Media, 012620 of 03.06.1994 (print)

Registered by the Roskomnadzor FS77-61404 of 10.04.2015 (online)

The Founder

Federal State Institution

“Russian Foundation for Basic Research”

Editor-in-Chief V. Panchenko,

Deputy chief editors V. Kvardakov and V. Fridlyanov

Editorial Board:

V. Ananikov, V. Betelin, K. Degtyarev, I. Eremenko,

P. Kashkarov, V. Matveenko, E. Moiseev, A. Sigov,

V. Tkachuk, R. Petrov, D. Khokhlov

Editorial staff:

E. Dubkova, I. Mosicheva

Editorial address:

32a, Leninskiy Ave., Moscow, 119334, Russia

Tel.: (499) 995-16-05

e-mail: pressa@rfbr.ru

«Вестник РФФИ»

№ 1 (121) январь–март 2024 года

КОЛОНКА ТЕМАТИЧЕСКОГО РЕДАКТОРА

О редакторе тематического блока профессоре В.М. Гордиенко 6

Беспилотные транспортные средства в умном городе – методы и интеллектуальные системы мониторинга и управления движением 8

В.М. Гордиенко

ТЕМАТИЧЕСКИЙ БЛОК: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ «УМНОГО ГОРОДА»

Оптимизация характеристик системы интеллектуального управления наземными беспилотными транспортными средствами с использованием генетических алгоритмов 12

А.С. Акопов, Л.А. Бекларян

Разработка и исследование реконфигурируемых быстродействующих алгоритмов распознавания изображений для оценки дорожной ситуации на базе специализированных мобильных устройств с параллельно-конвейерной архитектурой 22

С.В. Шидловский, Д.В. Шашев, А.С. Бондарчук, В.В. Шатравин, М.В. Окунский

Психофизиологические предикторы качества управления симулятором вождения автомобиля на фоне хронической депривации сна 33

О.Н. Ткаченко, В.Б. Дорохов, В.В. Дементюченко, Е.О. Гандина, Г.Н. Арсеньев, А.О. Таранов, А.Н. Пучкова, Д.С. Свешников

О построении интеллектуальной системы управления распределенными радиолокационными средствами для обнаружения объектов малоразмерной авиации в условиях плотной городской застройки 45

А.А. Сенцов, М.Б. Сергеев, Е.К. Григорьев

Имитационное моделирование и оценка эффективности систем обнаружения и противодействия беспилотным транспортным средствам, несущим угрозу нормальному функционированию «умного города» 54

Н.В. Быков, М.С. Товарнов, В.А. Федулов

Методология создания системы управления воздушным движением беспилотных транспортных средств «умного города» на основе мониторинга их траекторных параметров многопозиционными локационными комплексами с разнородными элементами 66

И.Ю. Гришин, Р.Р. Тимиргалеева

Интегрированная система обеспечения безопасности полетов беспилотных воздушных транспортных средств в едином воздушном пространстве «умного города» 77

В.В. Косьянчук, А.А. Обознов, Е.Ю. Зыбин, Ю.В. Бессонова

Разработка системы автономной навигации беспилотных транспортных средств с помощью ультразвуковых локационных методов 93

О.В. Руденко, А.С. Шуруп

Робототехнический комплекс обнаружения и локализации подводных источников шума 101

С.А. Переселков, В.М. Кузькин, Ю.В. Матвиенко



“RFBR Journal”
N 1 (121) January–March 2024

THEMED ISSUE EDITOR’S COLUMN

About the Editor of the Themed Section Professor V. M. Gordienko 7

Unmanned Vehicles in a Smart City – Methods and Intelligent Systems for Monitoring and Traffic Control 10

V. M. Gordienko

THEMED SECTION: FUNDAMENTAL PROBLEMS OF MANAGING UNMANNED VEHICLES IN A SMART CITY

Optimization of Intelligent Control System Characteristics for Unmanned Ground Vehicles with the Use of Genetic Algorithms 12

A.S. Akopov, L.A. Beklaryan

Development and Research of Reconfigurable High-Speed Image Recognition Algorithms for Traffic Situation Assessment Based on Specialized Mobile Devices with Parallel-Pipeline Architecture 22

S.V. Shidlovskiy, D.V. Shashev, A.S. Bondarchuk, V.V. Shatravin, M.V. Okunskiy

Psychophysiological Predictors of the Quality of Car Simulator Driving Against the Background of Chronic Sleep Deprivation 33

O.N. Tkachenko, V.B. Dorokhov, V.V. Dementienko, E.O. Gandina, G.N. Arsenyev, A.O. Taranov, A.N. Puchkova, D.S. Sveshnikov

On the Construction of an Intelligent Control System for Distributed Radar Facilities for Detecting Objects of Small-Sized Aviation in Dense Urban Areas 45

A.A. Sentsov, M.B. Sergeev, E.K. Grigoriev

Computer Simulation and System Efficiency Evaluation for Systems of Detecting and Countering of Unmanned Vehicles that Pose a Threat to a Smart City Transportation System 54

N.V. Bykov, M.S. Tovarnov, V.A. Fedulov

Methodology for Creating an Air Traffic Control System for Unmanned Vehicles of a Smart City Based on Monitoring of Their Trajectory Parameters by Multi-Position Location Complexes with Heterogeneous Elements 66

I.Yu. Grishin, R.R. Timirgaleeva

Integrated Flight Safety System for Unmanned Aerial Vehicles in a Single Smart City Sky 77

V.V. Kosyanchuk, A.A. Oboznov, E.Yu. Zybin, Yu.V. Bessonova

Development of Autonomous Navigation System for Remote-Control Vehicles using Ultrasound Location Techniques 93

O.V. Rudenko, A.S. Shurup

Robotic Complex for Detection and Localization of Underwater Noise Sources 101

S.A. Pereselkov, V.M. Kuz’kin, Yu.V. Matvienko



О редакторе тематического блока профессоре Вячеславе Михайловиче Гордиенко



- *Заведующий лабораторией нелинейной оптики и сверхсильных световых полей им. академика Р.В. Хохлова Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ)*
- *Head of Academician R. V. Khokhlov Laboratory of Nonlinear Optics and Ultrastrong Light Fields of Lomonosov Moscow State University (MSU)*
- *Председатель координационного совета физического факультета МГУ по медицинской физике*
- *Chairman of the Coordinating Council of the Faculty of Physics of MSU for Medical Physics*
- *Член Бюро российского отделения Общества оптики и фотоники (SPIE)*
- *Member of the Bureau of the Russian branch of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*
- *Заместитель председателя экспертного совета РФФИ по физике*
- *Deputy Chairman of the RFBR Expert Council in Physics*

Вячеслав Михайлович Гордиенко – хорошо известный в нашей стране и за рубежом ведущий специалист в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.

В.М. Гордиенко в 1969 г. окончил физический факультет МГУ. В 1970 г. начал трудиться на кафедре волновых процессов физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. В 1977 г. защитил кандидатскую диссертацию, а в 1998 г. – докторскую по лазерной физике. В 1999 г. ему было присвоено звание профессора. В настоящее время является заведующим лабораторией нелинейной оптики им. академика Р.В. Хохлова кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

В.М. Гордиенко является одним из основоположников нового направления в российской лазерной физике, связанного с взаимодействием сверхсильных световых полей с веществом. Под его руководством на отечественной техноло-

гической базе разработаны приоритетные решения по созданию пико- и фемтосекундных лазерных систем УФ и ИК диапазонов для реализации режима сверхсильного светового поля. Внедрение лазерных систем нового поколения позволило ему провести серию оригинальных исследований процессов, ответственных за нелинейное взаимодействие интенсивного пико- и фемтосекундного лазерного излучения с веществом в сильно неравновесном состоянии.

Научные интересы В.М. Гордиенко связаны с такими областями, как лазерная физика и нелинейная

оптика, а также с управлением и стабилизацией параметров ультракоротких твердотельных лазеров, мощных пико- и фемтосекундных лазерных систем УФ, видимого и ИК диапазонов. Им выполнены пионерские эксперименты по нелинейной релаксации сильно возбужденных многоатомных молекул. Разработаны дистанционные методы измерения скорости аэрозольных потоков в атмосфере на основе ветровых доплеровских лидаров. Под его руководством проведены оригинальные экспериментальные исследования по взаимодействию сверхсильных световых полей с микро- и нанообъектами (кластерами) с целью генерации высокотемпературной лазерной наноплазмы и частиц высоких энергий (электронов, ионов, нейтронов), получаемых в том числе при сверхкритических начальных условиях. продемонстрированы (с использованием низкоэнергетических волоконных

фемтосекундных лазеров) новые результаты по эффективной генерации микроплазменного рентгеновского излучения для задач радиографии. Им разработаны прецизионные оптические и нелинейно-оптические методы контроля в реальном времени процесса лазерной микрообработки материалов, в том числе и биологических тканей.

Более 300 статей опубликовано В.М. Гордиенко в ведущих отечественных и зарубежных журналах. Он является членом программных комитетов ряда крупных международных и отечественных конференций по лазерной физике, нелинейной оптике, сверхсильным полям в плазме и др. Был научным руководителем девятнадцати кандидатов физико-математических наук в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники. Среди его студентов есть также и представители профессорско-преподавательского состава ряда региональных вузов. Лаборатория нелинейной оптики имени академика Р.В. Хохлова, которым он руководит, продолжает традиции, заложенные этим ученым с мировым именем.

В.М. Гордиенко много лет был экспертом РФФИ, был заместителем председателя Экспертного совета по физике, выступал приглашенным редактором актуальных выпусков Вестника РФФИ «Фотоника и перспективные лазерные и лазерно-плазменные информационные технологии» (2014), «Современные проблемы инфракрасной фотоники» (2023).

About the Editor of the Themed Section Professor V.M. Gordienko

Vyacheslav Mikhailovich Gordienko is a well-known scientist in the field of laser physics, nonlinear optics and photonics in our country and abroad. V.M. Gordienko graduated from the Physics Department of Moscow State University in 1969. In 1970, he began working at the Department of Wave Processes at the Faculty of Physics of Lomonosov Moscow State University. He got his PhD, as well as his Doctor of Science Degree, in Lomonosov Moscow State University in 1977 and 1998, respectively. In 1999, he was awarded the title of Professor. Currently, he is the Head of the Academician Khokhlov Laboratory of Nonlinear Optics, Department of General Physics and Wave Processes, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University.

V.M. Gordienko was one of the founders of a new field in Russian laser physics related to the interaction of su-

per-strong light fields with matter. Under his leadership, priority solutions for the creation of pico- and femtosecond laser systems of UV and IR ranges for the implementation of a super-strong light field mode have been developed on the domestic technological base. The implementation of a new generation of laser systems made it possible to carry out a cycle of original research processes responsible for nonlinear interactions of intense pico- and femtosecond laser radiation with a substance in a highly nonequilibrium state.

Vyacheslav Gordienko's research interests are in areas such as laser physics and nonlinear optics, as well as control and stabilization of ultrashort solid-state lasers, high-power pico- and femtosecond laser systems in the UV, visible and IR ranges. He performed pioneering experiments on nonlinear relaxation of strongly excited polyatomic molecules. Remote methods for measuring the velocity of aerosol flows in the atmosphere based on wind Doppler lidars have been developed. Under his leadership, original experimental studies were carried out on the interaction of ultra-strong light fields with micro- and nano-objects (clusters) in the interests of generating high-temperature laser nanoplasma and high-energy particles (electrons, ions, neutrons), obtained, among other things, under the supercritical initial conditions. Using low-energy fiber femtosecond lasers, new results on the efficient X-ray generation

from microplasma for radiography tasks have been demonstrated. He developed precision optical and nonlinear optical methods for real-time monitoring of the process of laser microprocessing of materials, including biological tissues.

More than 300 scientific papers have been published by V.M. Gordienko in leading domestic and foreign journals. He is a member of the Program Committees of a number of major international and domestic conferences on laser physics, nonlinear optics, super-strong fields in plasma, *etc.* He was supervisor of nineteen PhD of physical and mathematical sciences in laser physics, nonlinear optics and photonics. Among his students, there are also representatives of the teaching staff from a number of regional universities. The Laboratory of Nonlinear Optics

named after Academician Khokhlov, which he directs, continues the traditions lay down by this world-famous scientist.

V.M. Gordienko has been the RFBR scientific expert for many years, he was Deputy Chairman of the Expert Council on Physics, and the Guest Editor of the topical issues of the *RFBR Journal* themed as “*Photonics and Advanced Laser and Laser Information Technologies*” (2014) and “*Contemporary Challenges of Infrared Photonics*” (2023).

Беспилотные транспортные средства в «умном городе» – методы и интеллектуальные системы мониторинга и управления движением

В.М. Гордиенко

За последние несколько десятилетий урбанизация стала глобальной тенденцией развития экономики и условий жизнедеятельности. Существующая проблема роста городского населения предъявляет всё большие требования не только к развитию новых технологий и инфраструктуры, но и к гражданам. Как следствие этого, требуются эффективные и экономически целесообразные результаты при соответствующей инфраструктурной поддержке для комфортного городского обитания. Решение этой проблемы состоит, помимо прочего, в эффективном развитии транспорта, информационных и коммуникационных технологий. Облачные вычисления, искусственный интеллект, машинное обучение – всё это существенно влияет как на тенденции развития, так и на динамику основных социально-экономических показателей «умного города». Особенно остро эти изменения сказываются на главных параметрах «умного города», среди которых, наряду с улучшением качества жизни, обостряется внимание к уровню безопасности и защите окружающей среды.

Применение передовых информационно-коммуникационных технологий в жизнедеятельности «умного города» является основополагающей тенденцией. «Умный транспорт» и «умное городское управление» транспортным движением меняет подходы к городской мобильности и к реагированию на чрезвычайные ситуации с одновременной оптимизацией транспортного движения. Возникает необходимость разработки методов оптимального управления движением беспилотных транспортных средств (БТС) и соответствующих для их реализации информационно-коммуникационных технологий. Современные технологии организации «умного транспорта» позволяют сделать перемещение по городу более удобным и более безопасным благодаря сочетанию искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО), поскольку ИИ позво-

ляет автоматизировать рутинные процессы, а МО дает возможность анализировать большие объемы данных для выявления скрытых закономерностей. Эффективность этих современных технологий уже сейчас подтверждается статистикой уменьшения «человеческого фактора» при автокатастрофах. С другой стороны города-мегаполисы насыщены транспортными средствами и поэтому дорожная инфраструктура подвержена большим нагрузкам, что приводит к снижению скорости передвижения по городу, увеличению времени нахождения в транспорте и, как результат, к возникновению у водителей симптома декремента бдительности. Появление в настоящее время «умных автомобилей» с интеллектуальным электронным помощником приводит еще и к тому, что внимание водителя может снижаться, а сонливость за рулем развивается быстрее. Хронический стресс, присущий жителям мегаполиса, влияет на качество вождения и, соответственно, повышает число ошибок. Поэтому возникает необходимость выработки простых критериев и инструментов для мониторинга в режиме реального времени состояния водителей автотранспорта, участвующих в движении на дорогах мегаполиса.

Unmanned Vehicles in a Smart City – Methods and Intelligent Systems for Monitoring and Traffic Control

V.M. Gordienko

Over the past few decades, urbanization has become a global trend in economic development and living conditions. The current problem of urban population growth places increasing demands not only on the development of new technologies and infrastructure, but also on citizens. As a consequence of this, effective and cost-effective results are required with appropriate infrastructural support for comfortable urban living. The solution to this problem lies, among other things, in the efficiency of development of transport, information and communication technologies. Cloud computing, artificial intelligence, machine learning – all this significantly influences both development trends and the dynamics of the main socio-economic indicators of a “smart city”. These changes have a particularly acute impact on the main parameters of a “smart city”, among which, along with improving the quality of life, there is increasing attention to the level of safety and environmental protection.

The application of advanced information and communication technologies in the life of a “smart city” is a fundamental trend. “Smart transportation” and “smart city traffic management” are changing approaches to urban mobility and emergency response while optimizing traffic flow. There is a need to develop methods for optimal control of the movement of unmanned vehicles (UVs) and information and communication technologies appropriate for their implementation. Modern technologies for organizing “smart transport” make it possible to make moving around the city more convenient and safer thanks to a combination of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML), since AI allows you to automate routine processes, and ML makes it possible to analyze large volumes of data to identify hidden patterns. The effectiveness of these modern technologies is already confirmed by statistics on the reduction of the “human factor” in car accidents. On the other hand, metropolitan cities are saturated with vehicles and therefore the road infrastructure is subject to heavy loads, which leads to a decrease in the speed of movement around the city, an increase in the time spent in transport and, as a result, to the emergence of a symptom of vigilance decrement among drivers. The current emergence of “smart cars” with intelligent electronic assistants also leads to the fact that the driver’s attention may decrease, and drowsiness while driving develops faster. Chronic stress inherent in metropolitan residents affects the quality of driving and, accordingly, increases the number of errors. Therefore, there is a need to develop simple criteria and tools for monitoring in real time the condition of vehicle drivers participating in traffic on the roads of a metropolis.

One of the new “smart city” technologies that have received special attention in recent years is the introduction of unmanned aerial vehicles (UAVs) in various aspects of urban life. UAVs move autonomously or using remote control, providing advantages in new delivery capabilities, such as small

cargo, *etc.* In this vein, a new and fundamentally important task is the creation of an autonomous navigation system for unmanned vehicles. It is necessary to develop an intelligent control system for distributed means for detecting small aircraft objects in dense urban areas. The use of UAV also plays a decisive role in maintaining the security of “smart cities” by detecting and thereby preventing possible threats. At the same time, there is an obvious need to develop means of operational monitoring of moving UAVs themselves, including those unauthorized penetrating into the “smart city” space. It is also important to create effective sensors and sensor networks that provide UAV recognition and monitoring of their movement. Therefore, developing methods for identifying unmanned vehicles that pose a threat to the functioning of “smart city” systems and countering them is a key task. The ever-increasing likelihood of using UAV in a “smart city” will inevitably be accompanied by the manifestation of certain systemic and complex problems, one of the key links of which is the human operator and his psycho-emotional state. Obviously, in the complicated conditions of a “smart city” the process of controlling a UAV is associated with an increase in psycho-emotional stress and visual fatigue of operators, which leads to a significant increase in their cognitive load. All this creates the pre-conditions for the manifestation of cognitive vulnerabilities of the human operator. So there is a natural need to develop and create a comprehensive system to ensure the safety of unmanned vehicle flights in the common airspace of a “smart city.” Its solution can be based on the relationship between the tasks of optimizing operational and functional safety to minimize the risks of UAV crashes, as



well as minimizing the manifestations of cognitive vulnerabilities of the human operator.

Thus, a “smart city”, being a modern metropolis, must have adaptive management of life support systems, which is carried out using innovative digital technologies. In a broad sense, the efficiency of operation and mobility of unmanned vehicles in a “smart city” is determined not only by management, but also by intelligent control over the authorized and unauthorized movements of land, air and water mobile devices both in the city itself and in its surrounding environment (air, water areas).

The subject of the interdisciplinary RFBR competition “Fundamental Problems of Managing Unmanned Vehicles in a «Smart City»”, as one of the most important areas of functioning of the socio-economic system in the context of urbanization, was the considera-

tion of a set of problems arising, in particular, due to the growing introduction of unmanned vehicles. UVs move in various environments and ensure the movement of people and goods both within the city and in adjacent territories and water areas. The creation of methods and approaches aimed at creating an effective system for monitoring and managing UVs as well as ensuring safe operation and maximum mobility of the transport system in conditions of their mass use is one of the conditions for the implementation of comprehensive plans for the development of modern “smart cities”.

It can be stated that the decision to hold the Interdisciplinary Competition of the Russian Foundation for Basic Research “Fundamental Problems of Managing Unmanned Vehicles in a «Smart City»”, which was adopted by the Foundation Council in 2019, anticipated the trends and challenges that subsequently occurred both in the world and in our country. It is also significant that the results of the fundamental task, obtained on the platform of interdisciplinary research, demonstrate the harmonization of approaches and new fundamental results.

The authors of the articles published in this issue of the *RFBR Journal* represent the results of their investigations which have been financed by the RFBR within the framework of the above-mentioned scientific direction. I hope that the materials in this journal issue will be of interest to a wide range of readers.



Оптимизация характеристик системы интеллектуального управления наземными беспилотными транспортными средствами с использованием генетических алгоритмов*

А.С. Акопов, Л.А. Бекларян

В данной работе исследованы возможности оптимизации ключевых характеристик разработанной системы интеллектуального управления наземными беспилотными транспортными средствами с использованием генетических алгоритмов. Представлена архитектура программного комплекса, спроектированного на основе разработанной имитационной модели поведения беспилотных транспортных средств (БТС), взаимодействующих с другими участниками дорожного движения – обычными транспортными средствами (ОТС), пешеходами и др. Сформулирована и решена двухкритериальная оптимизационная задача, целевыми функционалами которой являются трафик выходного потока и число потенциальных аварий с участием БТС. Выполнены эксперименты класса Монте-Карло, подтверждающие чувствительность значений целевых функционалов к управляющим параметрам модели при различных конфигурациях уличной дорожной сети. С использованием ранее созданных генетических оптимизационных алгоритмов вещественного кодирования построены фронты Парето, позволяющие выбрать наилучшие альтернативы, обеспечивающие наиболее предпочтительные режимы функционирования интеллектуальной транспортной системы при различных конфигурациях цифровых дорожных сетей (ЦДС).

Ключевые слова: имитационное моделирование дорожного движения, многокритериальная оптимизация, генетические алгоритмы, интеллектуальные беспилотные транспортные системы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-29-06003).

Введение

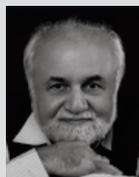
В настоящее время активно развиваются современные технологии управления наземными беспилотными транспортными средствами (БТС) в направлении повышения безопасности дорожного движения, минимизации рисков возникновения аварий, улучшения маневренности БТС в условиях интенсивного транспортного потока.

Одним из перспективных методов исследования поведения БТС, взаимодействующих с обычными транспортными средствами (ОТС), является использование феноменологического подхода, ранее предложенного авторами для моделирования поведения толпы в условиях чрезвычайных ситуаций [1] и получившего свое развитие в работах по моделированию поведения интеллектуальных транспортных систем (ИТС) [2–4]. Подобный подход принимает во внимание понятие личного пространства агента, радиус которого зависит от плотности окружающего пространства. В условиях увеличения плотности толпы вокруг агента, происходит сжатие его личного пространства до определенного

порогового уровня, после которого этот радиус резко возрастает из-за возникновения паники и стремления агента увеличить свое личное пространство, что приводит к появлению сильных волн сжатия и «эффекту турбулентности» и «давки». Подобные эффекты являются основной причиной гибели людей в толпе, так как образующиеся волны сжатия выталкивают агентов, расположенных по краям, на ближайшие препятствия (например, стены, рельсы и т. д.). Аналогичные процессы наблюдаются в плотном дорожном потоке. При возникновении пробок некоторые водители прибегают к частому маневрированию, стремятся расширить свое личное пространство, вынуждают других водителей также маневрировать,



АКОПОВ
Андраник Сумбатович
профессор,
Центральный экономико-
математический институт
РАН



БЕКЛАРЯН
Лева Андреевич
профессор,
Центральный экономико-
математический институт РАН

чтобы избежать аварии. В отличие от ОТС, БТС способны к сохранению малой дистанции по отношению к другим агентам ИТС. Однако при этом у БТС более жесткая (слабо адаптивная) система принятия индивидуальных решений, что затрудняет маневрирование при возникновении нестандартных ситуаций (например, при неожиданном возникновении препятствий на проезжей части дороги, в условиях резкого снижения видимости, ухудшения качества дорожного покрытия и т. д.). Поэтому, необходима разработка новых алгоритмов поведения БТС, в том числе с использованием вероятностных методов принятия решений [2], нечеткой логики [3], генетических оптимизационных алгоритмов [3–5].

Можно выделить три ключевых направления исследования поведения ИТС «умного города». Во-первых, построение макроскопических моделей транспортных потоков, основанных на изучении взаимосвязей между такими характеристиками как плотность, средняя скорость транспортного потока и т. д. по аналогии с известными гидродинамическими моделями [6–9]. В частности, подробный анализ таких моделей представлен в книге [10].

Второе направление относится к построению мегаскопических моделей, нацеленных на большую детализацию транспортных потоков (например, выделение различных типов агентов ИТС, образующих соответствующие кластеры) с сохранением вычислительной эффективности, свойственной макроскопическим моделям [11–13].

Третий класс моделей – микроскопические [14–16]. Важным преимуществом микроскопических транспортных моделей является возможность принятия во внимание индивидуальных правил принятия решения специфичных для различных участников

дорожного движения, например, БТС, ОТС, пешеходов и т. д. Недостатком являются высокие затраты вычислительных ресурсов, что требует применения суперкомпьютерных технологий. Представленная в данном исследовании система основана на микроскопических транспортных моделях агентного типа. В таких моделях поведение ансамбля БТС и ОТС описывается с использованием систем конечно-разностных уравнений с переменной структурой, в рамках которой агенты принимают индивидуальные решения (например, о маневрировании, смены полосы движения, увеличении дистанции относительно других агентов и т. д.).

Цель данной статьи состоит в систематизации и представлении основных результатов, полученных в рамках проекта по разработке системы интеллектуального управления наземными беспилотными транспортными средствами с использованием методов агентного моделирования, нечеткой кластеризации и генетических алгоритмов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках направления «Фундаментальные проблемы управления беспилотными транспортными средствами “умного города”».

Постановка задачи

Поведение БТС, взаимодействующих с ОТС и другими участниками дорожного движения, изучается с использованием цифровых дорожных сетей различной конфигурации (рис. 1).

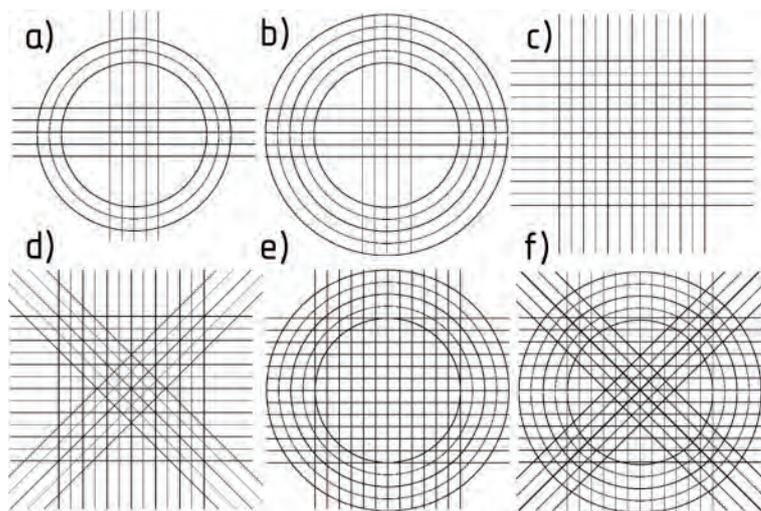


Рис. 1. Конфигурации ЦДС: а – простая радиально-кольцевая, б – расширенная радиально-кольцевая, с – прямоугольная, д – прямоугольно-диагональная, е – прямоугольно-кольцевая, ф – прямоугольно-диагонально-кольцевая.

Формальное описание математической модели движения ансамбля БТС в ЦДС, представленной на рис. 1, дано в [2]. Такая модель использует систему конечно-разностных уравнений с переменной структурой для реализации пространственной динамики БТС и ОТС в ЦДС с различной

геометрией, а также принятия во внимание различных сценариев взаимодействия с другими агентами (типа V2V, V2P, V2I и др.). При этом основным отличием модели поведения БТС от ОТС является:

- наличие индивидуальной системы принятия решений, устойчивой по отношению к меняющимся характеристикам внешней среды (то есть «поведение, не поддающееся панике в плотном транспортном потоке»), что выражается, в частности, в готовности БТС к уменьшению своего личного пространства до более низких пороговых значений с одновременным отказом от частного маневрирования, свойственного ОТС (что является одной из причин возникновения аварий);

- использование полных данных о структуре и плотности транспортного потока при смене полос движения и выборе маршрутов объезда формирующихся дорожных заторов, интеллектуальное маневрирование в транспортном потоке;

- полное соблюдение правил дорожного движения и др.

Далее будет рассмотрена задача двухкритериальной оптимизации для рассматриваемой ИТС.

Пусть

- $T = \{t_0, t_1, \dots, |T|\}$ – набор моментов времени (по минутам), $|T|$ – все моменты времени; $t_0 \in T, t_{|T|} \in T$ – начальный и конечный моменты;

- $TA(t_k)$ – суммарное количество потенциальных аварий с участием БТС и других агентов в момент времени t_k , ($t_k \in T$);

- $OT(t_k)$ – суммарный трафик выходного потока всех транспортных средств (ТС) из ЦДС в момент времени t_k , ($t_k \in T$).

При этом учитываются следующие управляющие параметры, влияющие на динамику и поведение БТС в ЦДС, значения которых устанавливаются в начальный момент t_0 ($t_0 \in T$):

- $p_0 \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ – конфигурация ЦДС, значение которой задается в начальный момент t_0 ($t_0 \in T$) $p_0=1$ – простая радиально-кольцевая, $p_0=2$ – расширенная радиально-кольцевая, $p_0=3$ – прямоугольная, $p_0=4$ – прямоугольно-диагональная, $p_0=5$ – прямоугольно-кольцевая, $p_0=6$ – прямоугольно-диагонально-кольцевая;

- $\{n_0, \tilde{n}_0\}$ – интенсивность прибытия агентов ОТС и БТС (количество ТС) в ЦДС, задаваемая в начальный момент $t_0 \in T$;

- $\{v_0, \tilde{v}_0\}$ – предпочтительные скорости ОТС и БТС в ЦДС, задаваемые в начальный момент $t_0 \in T$.

Таким образом, можно сформулировать следующую двухкритериальную оптимизационную задачу для рассматриваемой ИТС.

Задача А. Минимизировать общее число потенциальных аварий и максимизировать суммарный трафик выходного потока по имеющемуся набору $\{n_0, \tilde{n}_0, v_0, \tilde{v}_0\}$ управляющих параметров:

$$\begin{cases} \min_{\{n_0, \tilde{n}_0, v_0, \tilde{v}_0\}} \sum_{t_k=0}^{|T|} TA(t_k) \\ \max_{\{n_0, \tilde{n}_0, v_0, \tilde{v}_0\}} \sum_{t_k=0}^{|T|} OT(t_k) \end{cases} \quad (1)$$

при ограничениях:

$$\underline{n}_0 \leq n_0 \leq \bar{n}_0, \quad \underline{\tilde{n}}_0 \leq \tilde{n}_0 \leq \bar{\tilde{n}}_0, \quad \underline{v}_0 \leq v_0 \leq \bar{v}_0, \quad \underline{\tilde{v}}_0 \leq \tilde{v}_0 \leq \bar{\tilde{v}}_0.$$

Здесь $\{\underline{n}_0, \underline{\tilde{n}}_0, \underline{v}_0, \underline{\tilde{v}}_0\}, \{\bar{n}_0, \bar{\tilde{n}}_0, \bar{v}_0, \bar{\tilde{v}}_0\}$ – нижние и верхние границы значений управляющих параметров соответственно. Задача (1) относится к классу задач двухкритериальной оптимизации, в которых значения целевых функционалов вычисляются в результате имитационного моделирования «simulation-based optimization». Для решения данной задачи был выбран ранее разработанный генетический алгоритм с вещественным кодированием (FCGA) [3, 4].

Принцип работы подобных генетических оптимизационных алгоритмов (класса RCGA – real-coded genetic algorithms) основан на использовании эвристических операторов селекции, скрещивания и мутации. В отличие от стандартных генетических, все операции по формированию новых потенциальных решений в рамках процедуры эволюционного поиска в RCGA осуществляются напрямую с вещественными значениями искомых переменных. Это позволяет решать оптимизационные задачи существенно большей размерности (с улучшенной точностью), в том числе масштаба ИТС «умного города».

При решении **Задачи А** важной характеристикой является доля БТС в общем транспортном потоке, которая задается как внешний сценарный параметр (в диапазоне от 0 до 1). При проведении оптимизационных экспериментов соотношение БТС и ОТС было выбрано на уровне 10%, что соответствует перспективным трендам внедрения автономных ТС.

В **Задаче А** интенсивность трафика и рекомендуемые скорости являются управляющими параметрами



Рис. 2. Укрупненная архитектура программного комплекса, разработанного для ИТС.

трами. При этом для практической реализации режимов функционирования ИТС с вычисленными (субоптимальными) значениями скоростей и интенсивностей возможно использование «умных» светофоров в уличной дорожной сети (например, на входе и выходе локальных участков ЦДС), регулирующих трафик дорожного движения в соответствии с заданными предпочтениями и ограничениями. Рациональное размещение подобных светофоров в ЦДС с определением наилучших значений длительности фаз регулирующих сигналов является отдельной оптимизационной задачей [5].

Программный комплекс

В рамках проекта разработан программный комплекс, позволяющий, в частности, исследовать поведение ансамбля БТС при различных конфигурациях ЦДС и характеристиках внешней среды. Подобная система основана на созданной ими-

тационной модели ИТС, реализованной с использованием FLAME GPU [2, 4] и агрегированной по целевым функционалам с модулем нечеткой кластеризации и предложенным генетическим оптимизационным алгоритмом. Укрупненная архитектура спроектированного программного комплекса представлена на рис. 2.

Разработанный программный комплекс (рис. 2), включает:

- имитационную модель ИТС с реализацией во FLAME GPU (см. [2, 4]);
- модуль нечеткой кластеризации, предназначенный для оценки структуры транспортного потока, обеспечения возможности маневрирования БТС на основе оценки плотности потока в том числе, смены полосы движения, идентификации дорожных заторов и выбора наименее загруженного маршрута и др. [3];
- генетический оптимизационный алгоритм, предназначенный для решения важной двухкритериальной оптимизационной задачи ИТС по максимизации суммарного трафика выходного потока и минимизации суммарного количества потенциальных аварий;
- подсистему визуализации пространственной динамики агентов, реализованную с использованием OpenGL;
- подсистему визуализации фронтов Парето и выбора наиболее предпочтительных альтернатив. Данный модуль предназначен для визуализации полученных с использованием генетического алгоритма субоптимальных

решений и построения аппроксимированных фронтов Парето. При этом каждому частному решению, которое может быть выбран на границе Парето, соответствует определенная конфигурация ЦДС (индивидуальные характеристики ЦДС, например, скорость, интенсивность движения и т. д.);

– базу данных системы, используемая для хранения и анализа результатов множественных прогонов имитационной модели ИТС, в том числе субоптимальных решений, полученных с использованием генетического алгоритма.

Подробное описание спроектированного программного комплекса представлено в [17].

Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлены результаты численных экспериментов (распределения плотностей вероятностей сценариев развития дорожной ситуации с участием БТС и ОТС), выполненных для исследуемой ИТС при различных конфигурациях ЦДС с использованием метода класса Монте-Карло для интервала имитационного моделирования, ограниченного одним часом. При проведении численных экспериментов класса Монте-Карло ряд параметров задавался случайным образом с использованием равномерного распределения с заданными интервалами, в частности, задавались следующие характеристики (при фиксированной доле БТС в транспортном потоке на уровне 0.1):

- предпочтительная скорость БТС и ОТС (от 30 до 110 км/ч);
- интенсивность прибытия БТС и ОТС в ЦДС (от 1 до 10 ТС/мин).

Из рис. 3 следует, что существуют сценарии, соответствующие вариантам конфигурации ЦДС, при которых обеспечивается минимальное число потенциальных аварий с участием БТС. В частности, наиболее благоприятное развитие дорожной ситуации наблюдается для ЦДС с прямоугольно-диагональной и прямоугольно-диагонально-кольцевой геометрией, сохраняемое в том числе при высокой скорости и интенсивности входного потока ТС 100–120 (км/ч) и 8–10 (ТС/мин) соответственно.

На рис. 4 показаны фронты Парето, полученные при решении Задачи А с использованием ранее предложенного генетического алгоритма с вещественным кодированием (FCGA).

Результаты, представленные на рис. 4, подтверждают наличие субоптимальных решений, соответствующих безаварийным сценариям, а также устойчивость индивидуальной системы принятия решений БТС по отношению к риск-факторам. Среди исследованных риск-факторов, также влияющих на динамику потенциальных ава-

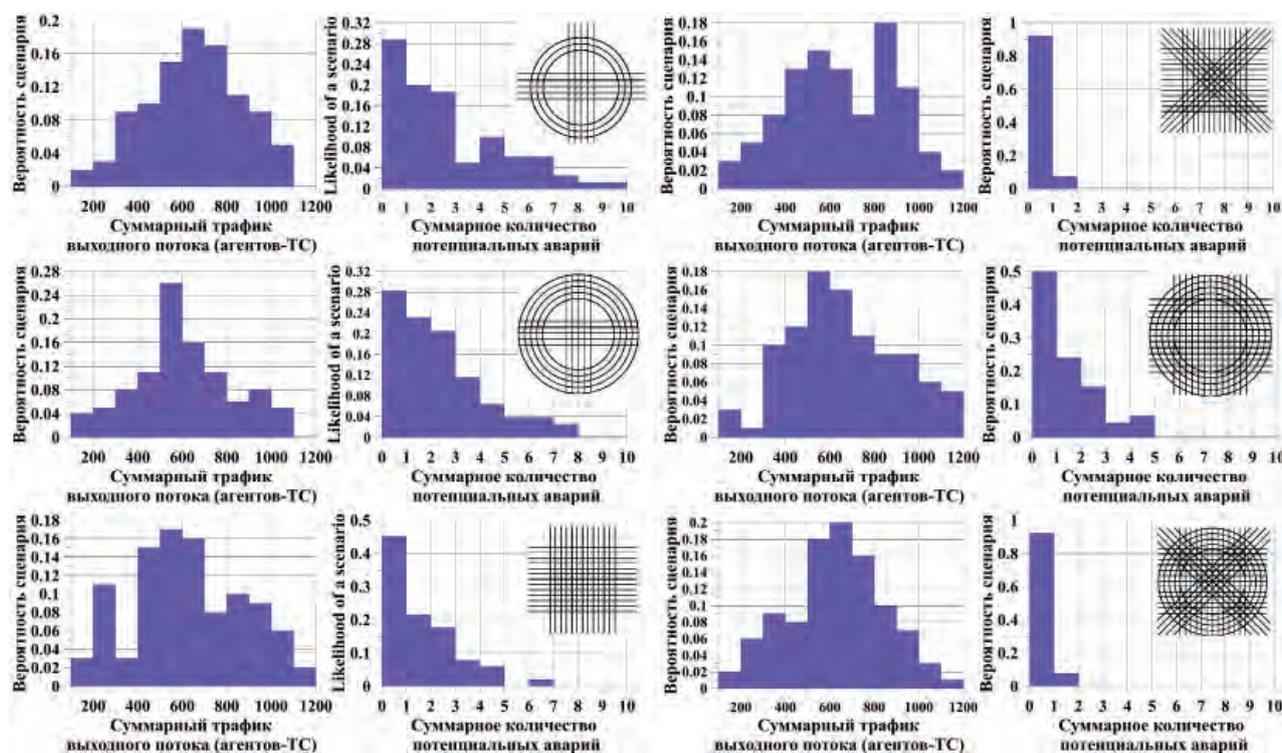


Рис. 3. Результаты численных экспериментов класса Монте-Карло для ИТС при различных конфигурациях ЦДС.

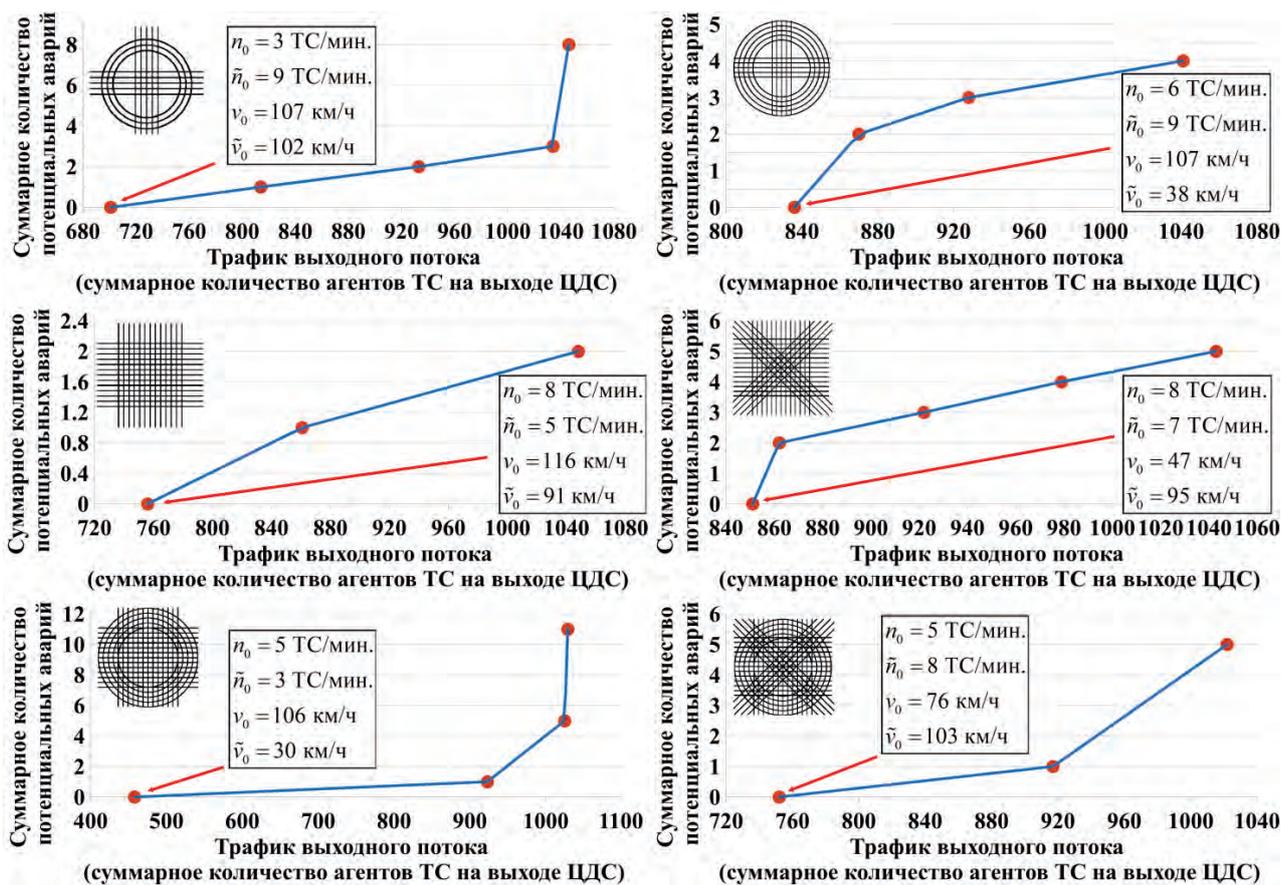


Рис. 4. Фронтны для ИТС, полученные с использованием генетического алгоритма при различных конфигурациях ЦДС.

рий, были приняты во внимание: уровень видимости, состояние дорожного покрытия, неожиданные появления пешеходов и других препятствий и др. [2].

Практическая реализация ИТС, обеспечивающих малоаварийный трафик БТС и ОТС, возможна:

– во-первых, за счет выбора таких конфигураций ЦДС, которые позволяют снизить плотность дорожного потока, равномерно распределив ТС в ЦДС (например, за счет использования прямоугольной и прямоугольно-диагональной схем уличной дорожной сети, представленных ранее на рис. 1);

– во-вторых, за счет внедрения «умных» светофоров [5], рациональное размещение которых в ЦДС с выбором оптимальных значений длительностей фаз регулирующих сигналов позволит эффективно управлять интенсивностью и скоростью транспортных потоков, существенно снижая риск возникновения аварийных ситуаций с участием БТС.

Заключение

В данной работе представлен подход к разработке системы интеллектуального управления наземными беспилотными транспортными средствами с использованием генетических алгоритмов. Рассмотрена проблема управления ансамблем наземных беспилотных транспортных средств, взаимодействующих с обычными транспортными средствами и другими участниками дорожного движения. Сформулирована и решена с использованием генетических оптимизационных алгоритмов важная задача по минимизации общего количества потенциальных дорожно-транспортных происшествий и максимизации суммарного трафика выходного потока. С использованием экспериментов класса Монте-Карло и полученных для исследуемой ИТС фронтон Парето продемонстрированы как наличие субоптимальных решений, соответствующих безаварийным сценариям, так и устойчивость индивидуальной системы принятия решений БТС по отношению к риск-факторам.

Дальнейшими направлениями исследований является моделирование динамики транспортных и пешеходных в ЦДС с «умными светофорами», регулирующими интенсивность трафика БТС и ОТС. Также будут исследованы вопросы как существования, так и особенности аналитических солитонных решений для Манхэттенской решетки.

Литература

1. А.С. Акопов, Л.А. Бекларян
Автом. и телемех., 2015, №10, 131.
2. А.С. Акопов, Л.А. Бекларян
Бизнес-информатика, 2022, 16(4), 19.
DOI: 10.17323/2587-814X.2022.4.19.35.
3. A.S. Akopov, L.A. Beklaryan, M. Thakur
IEEE Trans. Intel. Transp. Syst., 23(8), 12648.
DOI: 10.1109/TITS.2021.3115827.
4. A.S. Akopov, L.A. Beklaryan
Cybern. Inf. Technol., 2021, 21(3), 127.
DOI: 10.2478/cait-2021-0034.
5. А.Л. Бекларян, Л.А. Бекларян, А.С. Акопов
Бизнес-информатика, 2023, 17(3), 70.
DOI: 10.17323/2587-814X.2023.3.70.86.
6. P.I. Richards
Oper. Res., 1956, 4, 42.
7. A. Kotsialos, M. Papageorgiou, C. Diakaki, Y. Pavlis, F. Middelham
IEEE Trans. Intel. Transp. Syst., 2002, 3(4), 282.
DOI: 10.1109/TITS.2002.806804.
8. N. Chiabaut, C. Buisson, L. Leclercq
IEEE Trans. Intel. Transp. Syst., 2009, 10(2), 355.
DOI: 10.1109/TITS.2009.2018963.
9. M. Keyvan-Ekbatani, M. Yildirimoglu, N. Geroliminis, M. Papageorgiou
IEEE Trans. Intel. Transp. Syst., 2015, 16(4), 2141.
DOI: 10.1109/TITS.2015.2399303.
10. Введение в математическое моделирование транспортных потоков, под ред. А.В. Гасникова, РФ, Москва, МФТИ, 2010, 362 с. (https://mipt.ru/education/chair/computational_mathematics/upload/22b/Book-arpglktefbb.pdf).
11. M. Di Gangi
IEEE Trans. Intel. Transp. Syst., 2011, 12(4), 1157.
DOI: 10.1109/TITS.2011.2143408.
12. M. Florian, M. Mahut, N. Tremblay
B Proc. ITSC 2001. IEEE Trans. Intel. Transp. Syst. (Cat. No.01TH8585), USA, CA, Oakland, 2001, pp. 118–121.
DOI: 10.1109/ITSC.2001.948640.
13. J.C. Vilaró, A. Torday and A. Gerodimos
IEEE Intel. Transp. Syst. Magaz., 2010, 2(3), 25.
DOI: 10.1109/MITS.2010.939217.
14. D. Helbing
B A Perspective Look at Nonlinear Media. Lecture Notes in Physics, Vol. 503, Eds J. Parisi, S.C. Müller, W. Zimmermann, RFG, Berlin, Heidelberg, Springer Verl., 1998, pp. 122–139.
DOI: 10.1007/BFb0104959.
15. P.A. Lopez, M. Behrisch, L. Bieker-Walz, J. Erdmann, Y. Flötteröd, R. Hilbrich, L. Lücken, J. Rummel, P. Wagner, E. Wiessner
B Proc. 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), USA, HI, Maui, 2018, pp. 2575–2582.
DOI: 10.1109/ITSC.2018.8569938.
16. S. Panwai, H. Dia
IEEE Trans. Intel. Transp. Syst., 2005, 6(3), 314.
DOI: 10.1109/TITS.2005.853705.
17. А. Бекларян
Вестник ЦЭМИ, 2023, 6(1). DOI: 10.33276/S265838870025116-0.

English

Optimization of Intelligent Control System Characteristics for Unmanned Ground Vehicles with the Use of Genetic Algorithms*

Andranik S. Akopov
Professor,
Central Economics and Mathematics Institute, RAS
47 Nakhimovsky Ave., Moscow, 117418, Russia
akopovas@umail.ru

Levon A. Beklaryan
Professor,
Central Economics and Mathematics Institute, RAS
47 Nakhimovsky Ave., Moscow, 117418, Russia
akopovas@umail.ru

Abstract

This paper studies the possibilities of optimizing the main characteristics of the developed intelligent control system for unmanned ground vehicles with the use of genetic algorithms. Authors presented the software architecture designed on the basis of the developed simulation model of the behaviour of unmanned ground vehicles (UGVs) interacting with other road users such as manned ground vehicles (MGVs), pedestrians, *etc.* A two-objective optimization problem was formulated and solved, the objective functions of which are the output traffic flow and the number of potential accidents with a participation of UGVs. The Monte Carlo experiments were performed to confirm the sensitivity of the objective functions' values to the control parameters of the model under various configurations of the street road network. The Pareto fronts are computed with the use of the previously created real-coded genetic optimization algorithms. It allows choosing the best trade-offs that provide the most preferable operating modes of the intelligent transportation system under various configurations of digital road networks (DRNs).

Keywords: traffic simulation, multi-objective optimization, genetic algorithms, intelligent transportation systems.

*The work was financially supported by RFBR (project 19-29-06003).

Images

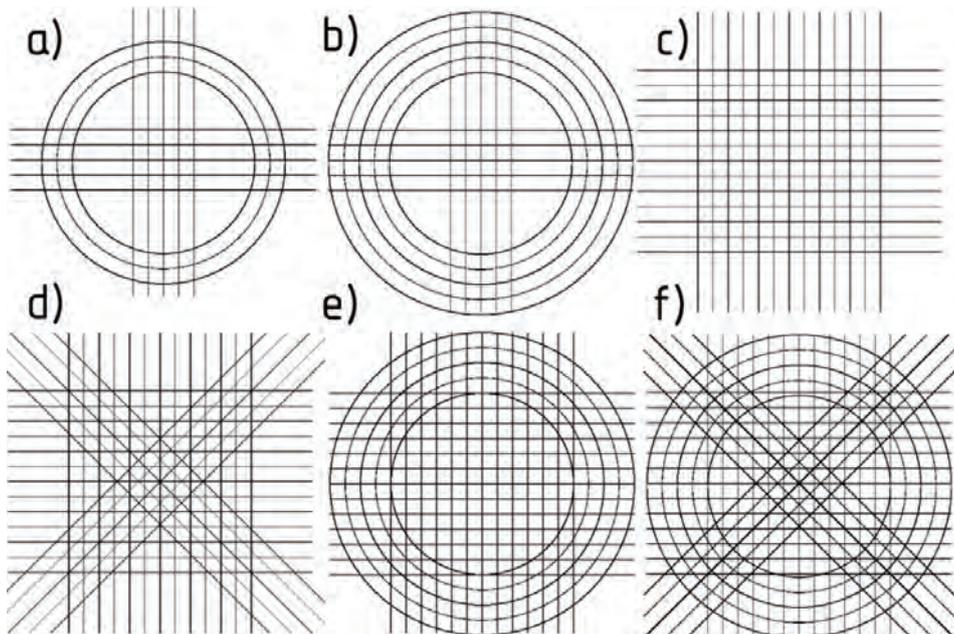


Fig. 1. DRN configurations: a – simple radial-annular, b – extended radial-circular, c – rectangular, d – rectangular-diagonal, e – rectangular-circular, f – rectangular-diagonal-circular.

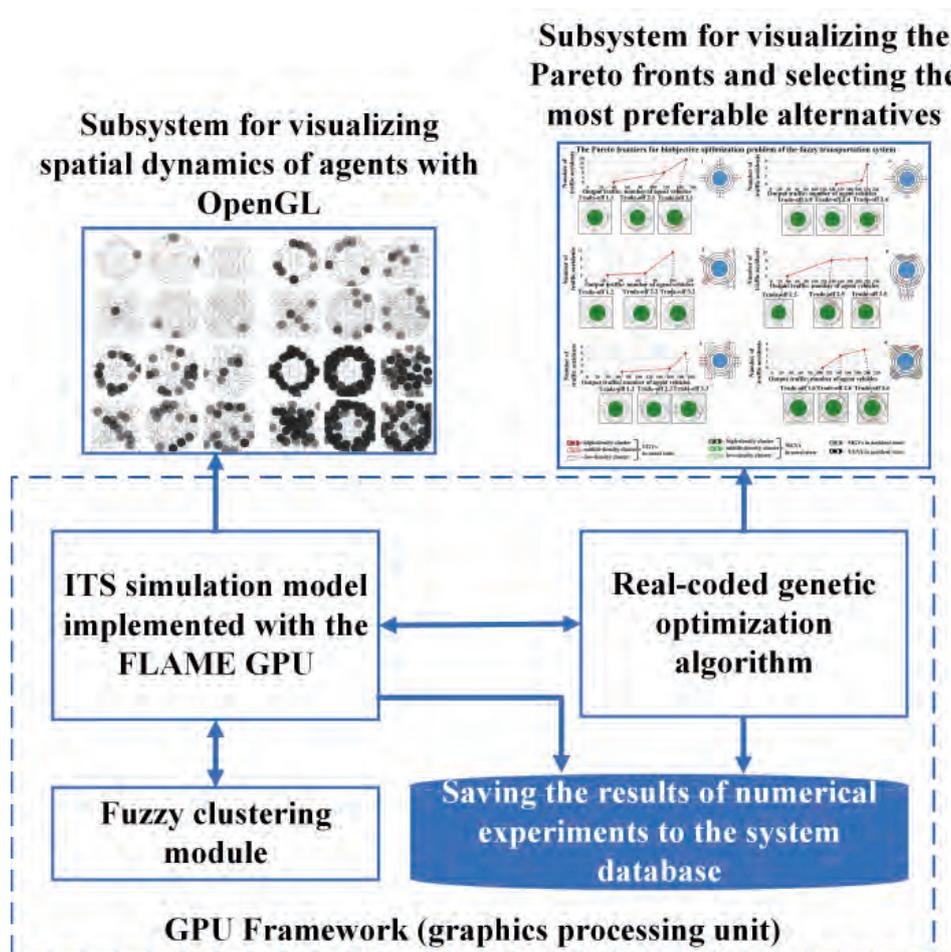


Fig. 2. Aggregated software architecture developed for the ITS.

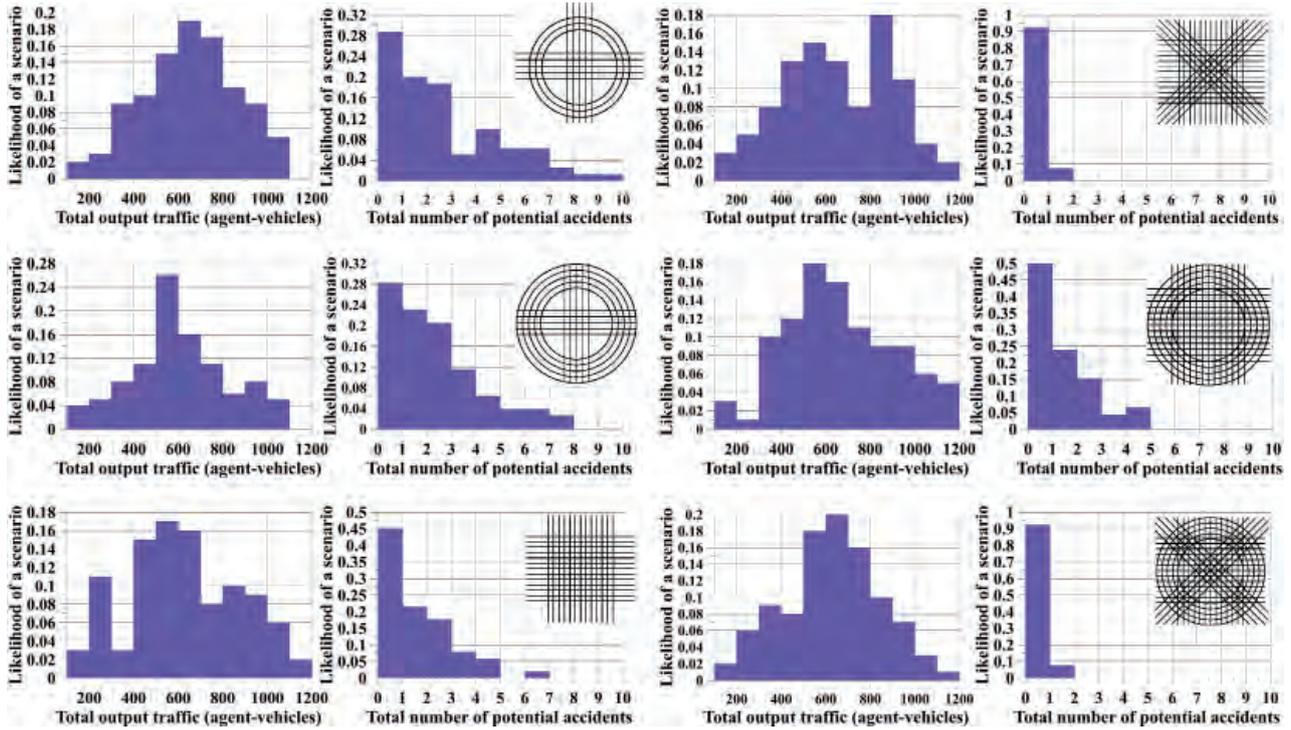


Fig. 3. Results of numerical experiments of the Monte Carlo type for the ITS under various configurations of DRN.

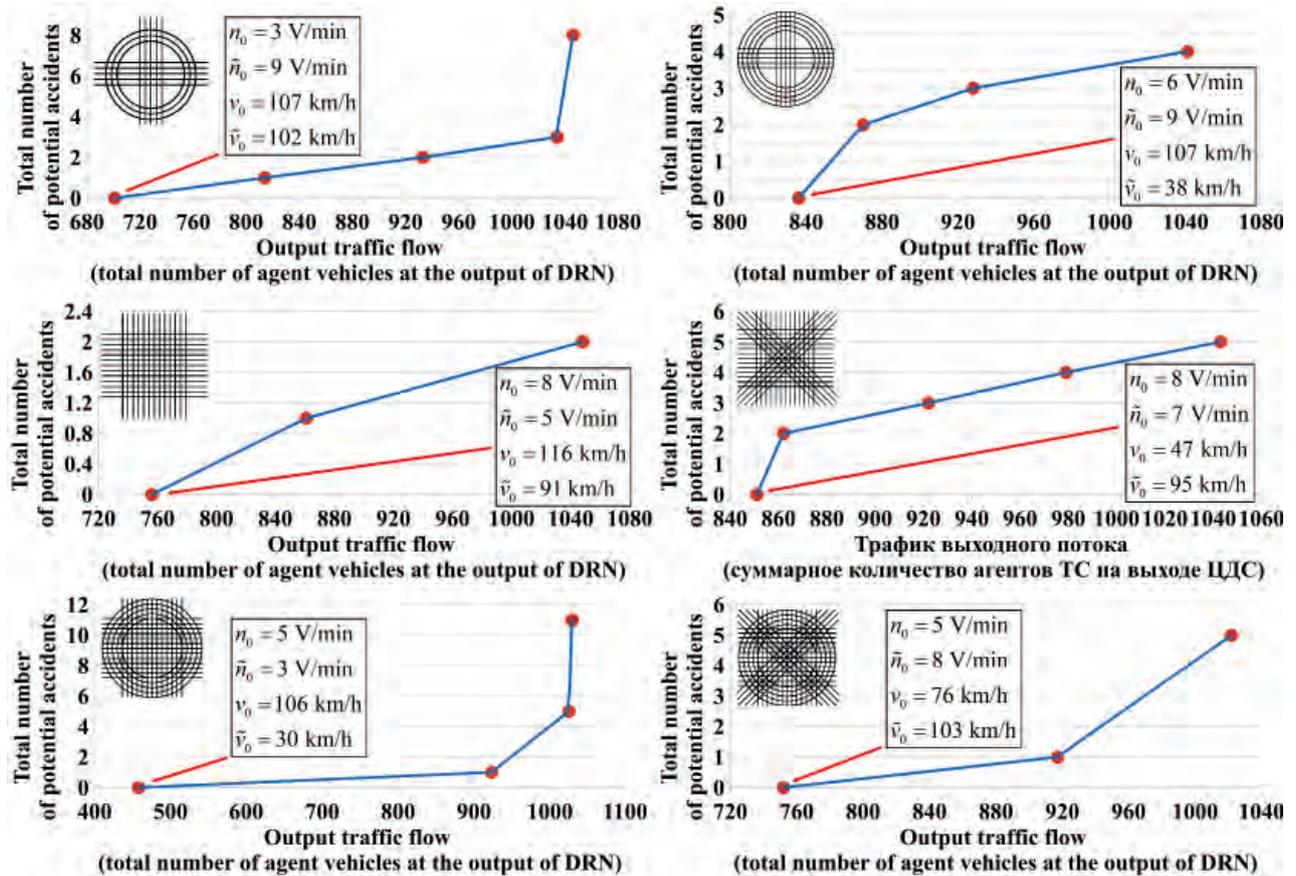


Fig. 4. The Pareto frontiers for the ITS obtained with the use of the genetic algorithm under various configurations of DRN.

References

1. **A.S. Akopov, L.A. Beklaryan**
Autom. Remote Control, 2015, **76**(10), 1817.
DOI: 10.1134/S0005117915100094.
2. **A.S. Akopov, L.A. Beklaryan**
Business Informatics, 2022, **16**(4), 19 (in Russian).
DOI: 10.17323/2587-814X.2022.4.19.35.
3. **A.S. Akopov, L.A. Beklaryan, M. Thakur**
IEEE Trans. Intel. Transp. Syst., **23**(8), 12648.
DOI: 10.1109/TITS.2021.3115827.
4. **A.S. Akopov, L.A. Beklaryan**
Cybern. Inf. Technol., 2021, **21**(3), 127.
DOI: 10.2478/cait-2021-0034.
5. **A.L. Beklaryan, A.L. Beklaryan, A.S. Akopov**
Business Informatics, 2023, **17**(3), 70 (in Russian).
DOI: 10.17323/2587-814X.2023.3.70.86.
6. **P.I. Richards**
Oper. Res., 1956, **4**, 42.
7. **A. Kotsialos, M. Papageorgiou, C. Diakaki, Y. Pavlis, F. Middelham**
IEEE Trans. Intel. Transp. Syst., 2002, **3**(4), 282.
DOI: 10.1109/TITS.2002.806804.
8. **N. Chiabaut, C. Buisson, L. Leclercq**
IEEE Trans. Intel. Transp. Syst., 2009, **10**(2), 355.
DOI: 10.1109/TITS.2009.2018963.
9. **M. Keyvan-Ekbatani, M. Yildirimoglu, N. Geroliminis, M. Papageorgiou**
IEEE Trans. Intel. Transp. Syst., 2015, **16**(4), 2141.
DOI: 10.1109/TITS.2015.2399303.
10. *Introduction to Mathematical Modeling of Traffic Flows [Vvedeniye v matematicheskoye modelirovaniye transportnykh potokov]*, Ed. A.V. Gasnikov, RF, Moscow, MIPT Publ., 2010, 362 pp. (in Russian).
(https://mipt.ru/education/chair/computational_mathematics/upload/22b/Book-arpglktefbb.pdf).
11. **M. Di Gangi**
IEEE Trans. Intel. Transp. Syst., 2011, **12**(4), 1157.
DOI: 10.1109/TITS.2011.2143408.
12. **M. Florian, M. Mahut, N. Tremblay**
In *Proc. ITSC 2001. IEEE Trans. Intel. Transp. Syst.* (Cat. No.01TH8585), USA, CA, Oakland, 2001, pp. 118–121.
DOI: 10.1109/ITSC.2001.948640.
13. **J.C. Vilaró, A. Torday and A. Gerodimos**
IEEE Intel. Transp. Syst. Magaz., 2010, **2**(3), 25.
DOI: 10.1109/MITS.2010.939217.
14. **D. Helbing**
In *A Perspective Look at Nonlinear Media. Lecture Notes in Physics, Vol. 503*, Eds J. Parisi, S.C. Müller, W. Zimmermann, RFG, Berlin, Heidelberg, Springer Verl., 1998, pp. 122–139.
DOI: 10.1007/BFb0104959.
15. **P.A. Lopez, M. Behrisch, L. Bieker-Walz, J. Erdmann, Y. Flötteröd, R. Hilbrich, L. Lücken, J. Rummel, P. Wagner, E. Wiessner**
In *Proc. 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, USA, HI, Maui, 2018, pp. 2575–2582.
DOI: 10.1109/ITSC.2018.8569938.
16. **S. Panwai, H. Dia**
IEEE Trans. Intel. Transp. Syst., 2005, **6**(3), 314.
DOI: 10.1109/TITS.2005.853705.
17. **A. Beklaryan**
Vestnik TsEMI [Herald of CEMI], 2023, **6**(1) (in Russian).
DOI: 10.33276/S265838870025116-0.

Разработка и исследование реконфигурируемых быстродействующих алгоритмов распознавания изображений для оценки дорожной ситуации на базе специализированных мобильных устройств с параллельно-конвейерной архитектурой*

С.В. Шидловский, Д.В. Шашев, А.С. Бондарчук, В.В. Шатравин, М.В. Окунский

В статье обобщаются результаты исследования применения перестраиваемых вычислительных сред для задач обработки изображений, получаемых на борту беспилотных транспортных систем. Был предложен новый подход к разработке специализированных быстродействующих алгоритмов распознавания изображений дорожной сцены, предназначенных для аппаратного выполнения на вычислителях с параллельно-конвейерной архитектурой по модели перестраиваемых вычислительных сред.

Рассмотрены архитектуры и алгоритмическое обеспечение таких сред для задач оценки дорожной ситуации. Новый сформированный класс алгоритмов распознавания изображений основан на вычислении дескрипторов LBP, HOG и классификатора SVM. Показано, что вычисления дескрипторов HOG в слое перестраиваемой вычислительной среды выполняются за один машинный такт для всего изображения, а время выполнения (при реализации на FPGA Intel Arria 10) не превышает 20 нс.

Ключевые слова: высокопроизводительные вычислительные системы, параллельные вычисления, перестраиваемые вычислительные среды, беспилотные транспортные средства.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-29-06078).

Введение

Развитие автономных беспилотных транспортных систем (БТС) и их повсеместное использование устанавливает актуальную научную проблему, заключающуюся в распознавании изображений непосредственно на борту БТС. Ключевой аспект проблемы – постоянно растущий объем видеоданных, а также вычислительная сложность алгоритмов, что приводит к необходимости использования дорогих массивных вычислительных устройств, использование которых в составе мобильных устройств фактически невозможно по ряду экономических и технических причин. Необходим подход, который позволит отойти от стандартных принципов адаптации существующих методов, а также от постоянного наращивания используемых вычислительных ресурсов.

Современное состояние исследований рассматриваемой научной проблематики заключается в тенденции построения реконфигурируемых многопроцессорных вычислителей для решения задач обработки, классификации и распознавания изображений [1–11]. Суть этой тенденции заключается в том, что архитектура вычислительной системы адаптируется под структуру решаемой задачи. Общеизвестно, что максимальное быстродействие обеспечивают вычислительные системы с аппаратной реализацией алгоритма. На данный



ШИДЛОВСКИЙ

Станислав Викторович
Национальный исследовательский Томский государственный университет



ШАШЕВ

Дмитрий Вадимович
Национальный исследовательский Томский государственный университет



БОНДАРЧУК

Антон Сергеевич
Национальный исследовательский Томский государственный университет



ШАТРАВИН

Владислав Владимирович
Национальный исследовательский Томский государственный университет



ОКУНСКИЙ

Михаил Викторович
Национальный исследовательский Томский государственный университет

момент наиболее распространено использование гибридных вычислительных устройств на базе FPGA и GPU. В многочисленных научных трудах как зарубежных, так и отечественных ученых, а также коммерческих работах крупных компаний, таких как Google, NVidia и пр., рассматриваются преимущества использования подобных вычислительных систем, при которых увеличение ускорения обработки изображений может достигать более 200 раз.

Однородные вычислительные устройства, частным случаем которых является перестраиваемые вычислительные среды (ПВС), уже продемонстрировали свою эффективность в задачах обработки данных. В основе тензорного процессора Google TPU лежат систолические матрицы [12], что обеспечивает существенный прирост скорости выполнения матричного умножения. А одним из наиболее многообещающих направлений сейчас являются так называемые «системы на пластине» (system-on-wafer), представляющие собой СБИС, занимающие полную площадь кремниевой пластины [13, 14]. Такие вычислители включают в себя триллионы транзисторов, сотни тысяч вычислительных ядер, а их вычислительные блоки чередуются с элементами памяти. В качестве примера можно привести устройство Wafer-Scale Engine 2 компании Cerebras (рис. 1), представляющее собой кремниевую пластину с площадью 46 тыс. мм² при техпроцессе 7 нм и насчитывающее 2.6 трлн транзисторов или 850 тыс. вычислительных



Рис. 1. Вычислитель Wafer-Scale Engine 2 M.

ядер, что позволяет реализовать даже крупные языковые модели (LLM) [13–15]. В качестве другого примера можно привести систему Tesla Dojo, также представляющую собой двумерную решетку из однородных вычислителей на цельной кремниевой пластине и предназначенную для решения задач искусственного интеллекта [16].

Целью данной работы является проведения исследований по адаптации алгоритмов распознавания изображений дорожной сцены (в частности, распознавания автомобилей и пешеходов), использующих дескрипторы LBP и HOG, а также классификатор SVM, под аппаратную реализацию на перестраиваемых вычислительных средах. В результате чего необходимо разработать методику формирования алгоритмов в виде автоматных отображений, описывающих принцип работы вычислительной среды, а также сформировать новый класс алгоритмов распознавания изображений.

Перестраиваемые вычислительные среды

ПВС является дискретная математическая модель высокопроизводительной вычислительной системы, состоящей из одинаковых и одинаково соединенных друг с другом простейших универсальных элементов, далее называемых элементарными вычислителями (ЭВ). ПВС представляет собой решетку с двумя или более количеством осей, в узлах которой расположены ЭВ, способные выполнить некоторый набор операций. Для указания того, какую операцию или функцию передачи сигналов требуется выполнить в необходимый момент времени, на каждый элементарный вычислитель ПВС подается соответствующий сигнал настройки, при этом передача сигналов в ПВС может осуществляться от любого ЭВ к любому другому ЭВ [17].

Размер решетки ПВС, предназначенной для обработки изображения, совпадает с размером данного изображения в пикселях. Таким образом, значения пикселей обрабатываемого изображения подаются на соответствующие им элементарные вычислители ПВС. С выходов элементарных вычислителей поступает необходимый результат цифровой обработки пикселей изображения.

Перестраиваемые вычислительные среды позволяют эффективно решать задачи цифровой обработки изображений. Эффективность достигается за счет возможности программно настроить алгоритмы в процессе функционирования вычислительной системы и/или перед началом ее работы. Принципы построения ПВС позволяют достигнуть высоких показателей быстродействия, надежности и адаптивности вычислительной системы. Высокие качественные показатели реализации алгоритмов обработки изображений на ПВС обеспечиваются за счет распараллеливания процессов обработки пикселей изображения, взаимозаменяемости ЭВ, их идентичности и одинаковых связей между ними, а также за счет способности изменять свою структуру для выполнения необходимых преобразований.

Вычисление LBP дескриптора

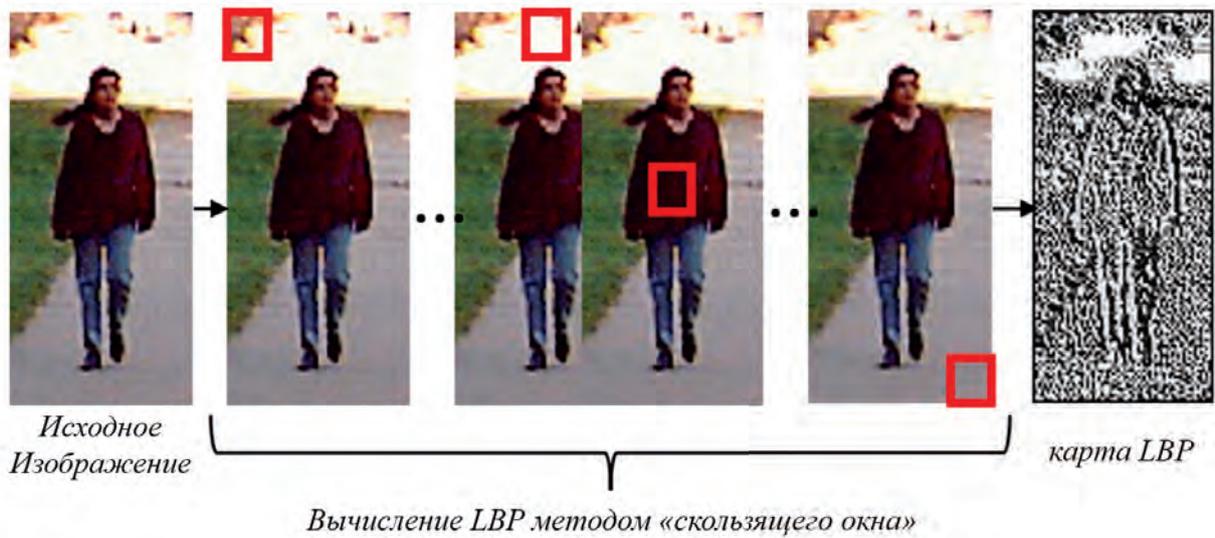
Так, для вычисления признаков LBP синтезирован ЭВ, описываемый следующей системой формул:

$$\begin{cases}
 f_1 = x(\bar{z}_2\bar{z}_3\bar{z}_4 \vee \bar{z}_1\bar{z}_2\bar{z}_3 \vee z_2z_3z_4\bar{z}_1), \\
 f_2 = x(\bar{z}_1\bar{z}_2 \vee z_3z_4\bar{z}_1 \vee \bar{z}_2\bar{z}_3\bar{z}_4), \\
 f_3 = x(z_4\bar{z}_1\bar{z}_2 \vee z_3\bar{z}_1\bar{z}_2 \vee z_1\bar{z}_2\bar{z}_3\bar{z}_4), \\
 f_4 = x(z_4\bar{z}_1\bar{z}_2 \vee z_3\bar{z}_1\bar{z}_2 \vee z_2\bar{z}_1\bar{z}_3 \vee z_1\bar{z}_2\bar{z}_3\bar{z}_4), \\
 f_5 = x(z_3z_4\bar{z}_1\bar{z}_2 \vee z_2\bar{z}_1\bar{z}_3 \vee z_1\bar{z}_2\bar{z}_3\bar{z}_4), \\
 f_6 = x(z_3z_4\bar{z}_1 \vee z_2\bar{z}_1 \vee z_1\bar{z}_2\bar{z}_3\bar{z}_4), \\
 f_7 = x(z_2z_4\bar{z}_1 \vee z_2z_3\bar{z}_1 \vee z_1\bar{z}_2\bar{z}_3\bar{z}_4), \\
 f_8 = x(\bar{z}_2\bar{z}_3\bar{z}_4 \vee z_4\bar{z}_1\bar{z}_3 \vee z_2z_3\bar{z}_1), \\
 f = \left(\sum_{n=1}^8 B(y_n, x) 2^{n-1} \right) z_1\bar{z}_2\bar{z}_3\bar{z}_4.
 \end{cases}
 \tag{1}$$

Здесь математическая модель ЭВ включает в себя информацию о количестве выходов (набор f_n), соединяющих элементарный вычислитель с соседними ЭВ, количестве информационных входов (x и набор y_n), а также о выходах (f) самой ПВС, получаемую путем соединения множества ЭВ между собой. Кроме того, в модель входит информация о настройке каждого ЭВ (набор z_k ($k=1, 2, \dots, 4$)), с помощью которого происходит реконфигурация модели.

В модели ПВС все пиксели изображения обрабатываются параллельно и одновременно для вычисления локального бинарного шаблона каждого пикселя. Полученные коды LBP в дальнейшем могут быть

Классический LBP



LBP для ПВС

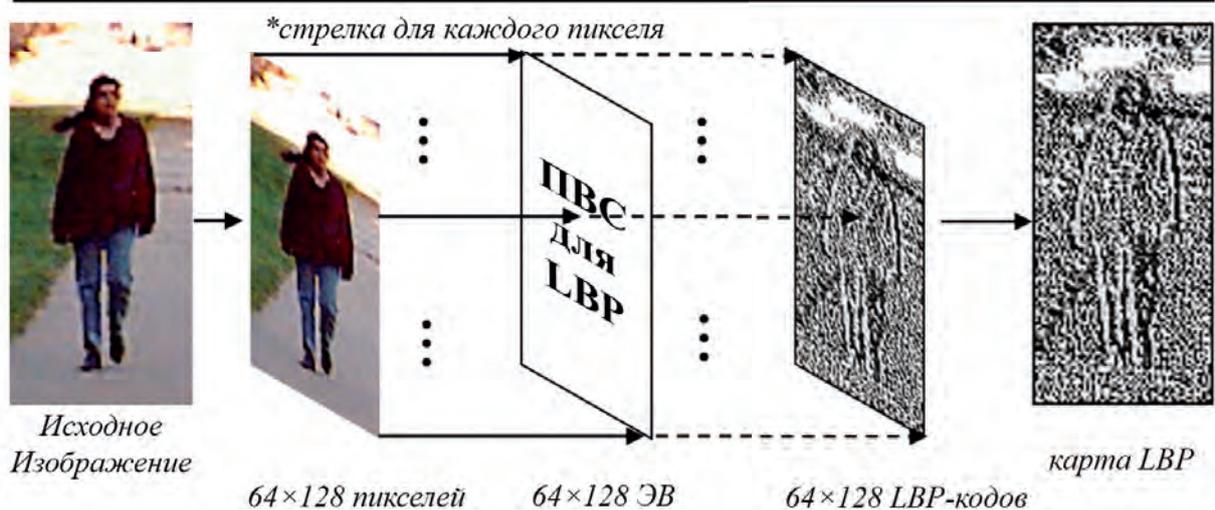


Рис. 2. Классический и предложенный способы нахождения дескриптора LBP.

использованы для классификации изображений. Например, результирующие изображения, полученные с помощью данного метода извлечения признаков, можно использовать в качестве данных для моделей машинного обучения.

На рис. 2 представлены принципы нахождения дескриптора LBP классическим способом (используя «скользящее окно») и предлагаемым способом – когда каждый пиксель изображения подается на свой, отдельный, элемент ПВС [18]. В результате всё изображение обрабатывается за один машинный такт работы ПВС. Длительность этого такта определяется в зависимости от того, какие функциональные возможности заложены в элементарный вычислитель на этапе проектирования.

В работе также были рассмотрены модификация алгоритма HOG для выделения признаков объекта интереса на изображении. Значения градиентов вычисляются в горизонтальном и вертикальном направлениях с помощью одномерных дифференцирующих масок: $[-1,0,1]$ и $[-1,0,1]^T$. Затем рассчитываются направление и величина градиента для каждого пикселя в изображении.

Вычисление HOG дескриптора

ЭВ, реализующий классическое представление алгоритма HOG, распараллеленного на вычис-

лительную архитектуру ПВС, можно описать следующей системой формул:

$$\begin{cases} f_1 = x(z_3 z_4 \bar{z}_1 \vee z_2 \bar{z}_1 \vee z_1 \bar{z}_2 \bar{z}_3 \bar{z}_4), \\ f_2 = x(\bar{z}_2 \bar{z}_3 \bar{z}_4 \vee \bar{z}_1 \bar{z}_2 \vee z_3 z_4 \bar{z}_1), \\ f_3 = x(z_3 \bar{z}_1 \bar{z}_2 \vee z_2 \bar{z}_1 \bar{z}_3 \vee z_4 \bar{z}_1 \bar{z}_2 \vee z_1 \bar{z}_2 \bar{z}_3 \bar{z}_4), \\ f_4 = x(\bar{z}_2 \bar{z}_3 \bar{z}_4 \vee z_4 \bar{z}_1 \bar{z}_3 \vee z_2 z_3 \bar{z}_1), \\ m = z_1 \bar{z}_2 \bar{z}_3 \bar{z}_4 \sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (y_3 - y_4)^2}, \\ \theta = \arctg\left(\frac{y_1 - y_2}{y_3 - y_4}\right) z_1 \bar{z}_2 \bar{z}_3 \bar{z}_4. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь f_i ($i=1, 2, \dots, 4$) – выходы ЭВ, предназначенные для соединения с соседними ЭВ в ПВС; m – выход ЭВ, характеризующий величину изменения яркости (длину вычисленного вектор) изображения; θ – выход ЭВ, характеризующий направление изменения яркости; x – вход ЭВ, на который подается значение обрабатываемого пикселя изображения; y_i ($i=1, 2, \dots, 4$) – вход ЭВ, на который подаются значения соответствующих f_i соседних ЭВ, несущих информацию об окружающих пикселях изображения; z_k ($k=1, 2, \dots, 4$) – входы ЭВ, с помощью которых происходит реконфигурация модели.

Для извлечения признаков бинарного изображения разработан алгоритм нахождения градиента по аналогии с алгоритмом HOG. Бинарный градиент состоит из величины m и направления ϕ изменения яркости соседних пикселей изображения с 0 на 1 или наоборот. Направление градиента может принимать три значения: 180, 225 и 270°. Если изменение яркости пикселей (между текущим пикселем и пикселями – соседями) отсутствует, то $m=0$, что означает отсутствие градиента. На рис. 3 представлены четыре возможных варианта значений градиента для рассматриваемого пикселя x по отношению к соседним пикселям y_1 и y_2 .

Значение направления градиента было закодировано двузначным двоичным числом $\phi = \phi_1 \phi_2$ согласно таблице 1.

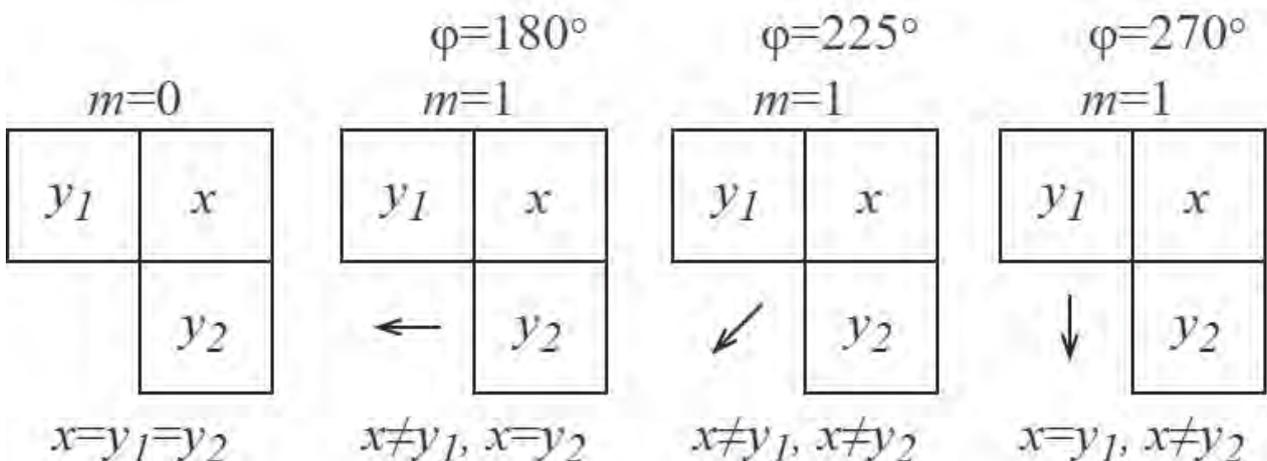


Рис. 3. Варианты значений бинарного градиента.

Таблица 1. Кодирование значений направления бинарного градиента

Φ	«Градиент отсутствует»	180°	225°	270°
Φ_1	0	0	1	1
Φ_2	0	1	0	1

Вектор признаков, состоящий из значений m , Φ_1 и Φ_2 бинарного градиента пикселей изображения, далее может использоваться для классификации объектов с помощью метода опорных векторов (SVM).

На *рис. 4* представлен результат вычисления направления бинарного градиента.

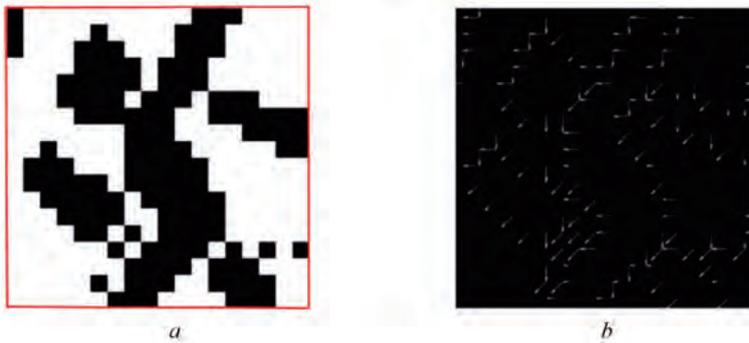


Рис. 4. Визуализация бинарного градиента на изображении: *a* – исходное бинарное изображение, *b* – визуализация бинарного градиента в каждом пикселе изображения

Классификатор SVM

Система уравнений, реализующая классификацию SVM на базе ЭВ, может быть представлена следующим образом [19]:

$$\begin{cases}
 f_1 = x(\bar{z}_1\bar{z}_2\bar{z}_3 \vee z_2z_4\bar{z}_1 \vee z_2z_3\bar{z}_1 \vee \bar{z}_2\bar{z}_3\bar{z}_4), \\
 f_2 = x(z_3z_4\bar{z}_1 \vee z_2\bar{z}_1\bar{z}_3 \vee z_2\bar{z}_1\bar{z}_4 \vee z_1\bar{z}_2\bar{z}_3\bar{z}_4), \\
 W = (w_m(x \vee (x \cdot \bar{y}_2 \vee \bar{x} \cdot y_2))) + w_{\delta 2}(x \cdot \overline{(x \cdot \bar{y}_2 \vee \bar{x} \cdot y_2)} \vee \\
 \vee \bar{x} \cdot (x \cdot \bar{y}_2 \vee \bar{x} \cdot y_2)))(\bar{z}_1\bar{z}_2\bar{z}_3\bar{z}_4 + z_2z_3z_4\bar{z}_1) + \\
 + w_{\delta 1}(x \cdot \bar{y}_2 \vee \bar{x} \cdot y_2)(\bar{z}_1\bar{z}_2\bar{z}_3 + z_3\bar{z}_1\bar{z}_2 + z_3z_4\bar{z}_1 + \bar{z}_2\bar{z}_3\bar{z}_4) + \\
 + (w_m((x \cdot \bar{y}_1 \vee \bar{x} \cdot y_1) \vee (x \cdot \bar{y}_2 \vee \bar{x} \cdot y_2)) + \\
 + w_{\delta 2}((x \cdot \bar{y}_1 \vee \bar{x} \cdot y_1) \cdot \overline{(x \cdot \bar{y}_2 \vee \bar{x} \cdot y_2)} \vee \\
 \vee (x \cdot \bar{y}_1 \vee \bar{x} \cdot y_1) \cdot (x \cdot \bar{y}_2 \vee \bar{x} \cdot y_2)))(z_4\bar{z}_1\bar{z}_2 + z_3\bar{z}_1\bar{z}_2 + z_1\bar{z}_2\bar{z}_3\bar{z}_4) + \\
 + (w_m((x \cdot \bar{y}_1 \vee \bar{x} \cdot y_1) \vee x) + w_{\delta 2}((x \cdot \bar{y}_1 \vee \bar{x} \cdot y_1) \cdot \bar{x} \vee \\
 \vee (x \cdot \bar{y}_1 \vee \bar{x} \cdot y_1) \cdot x))z_2\bar{z}_1\bar{z}_3 + x(w_{\delta 1}(z_2\bar{z}_1\bar{z}_3 + z_2\bar{z}_1\bar{z}_4) + w_mz_2z_3\bar{z}_1\bar{z}_4).
 \end{cases} \quad (3)$$

Здесь f_i ($i=1, 2$) – выходы ЭВ для соединения с соседними элементами; W – выход ЭВ, характеризующий «вес» обрабатываемого пикселя в алгоритме SVM; x – вход ЭВ, на который подается значение обрабатываемого пикселя; y_i ($i=1, 2$) – входы ЭВ, для связи с соседними элементами; w_m – весовые значения для составляющей m ; w_φ ($i=1, 2$) – весовые значения для кодированного направления яркости; z_k ($k=1, 2, \dots, 4$) – входы ЭВ, с помощью которых происходит реконфигурация модели.

Рассмотрим процесс распознавания объекта интереса на изображении с помощью модели перестраиваемой вычислительной среды на примере выделения характеристик бинарного градиента. Каждый пиксель исходного полутонового изображения подается на «свой» персональный ЭВ ПВС. Для реализации алгоритма распознавания используется три слоя ПВС.

На первом слое происходит формирование и выбор бинарного изображения из входного 8-битового представления полутонового изображения. На втором слое ПВС осуществляется вычисление величины градиента и его направления с привлечением аппарата булевого дифференцирования и синтезированной логики работы ЭВ. В качестве дополнительного информационного входа каждого ЭВ ПВС используется соответствующая компонента вектора весов, формируемого на основе классификатора SVM. Для формирования такого вектора необходимо, во-первых, выбрать или сформировать базу данных изображений с объектами интереса (для случая распознавания пешеходов была выбрана база изображений от Massachusetts Institute of Technology (MIT), the Center for Biological and Computational Learning (CBCL)). Результат визуализации весов для компонентов m и φ_i датасета CBCL представлен на *рис. 5*. Во-вторых, необходимо осуществить поэтапную обработку каждого изображения из базы данных путем вычисления для каждого пикселя каждого изображения из базы данных значений бинарного градиента и его направления. В-третьих, сформировать на основе полученных данных векторы признаков с сохранением их пространственного расположения на изображении и применить выбранный классификатор. В результате этого получим пространственное расположение предобученного вектора весов, соответствующее значению компоненты которого мы вносим в качестве дополнительной информации в соответствующий ему по пространственному расположению ЭВ ПВС.

В процессе распознавания компоненты вектора весов перемножаются

с полученными характеристиками бинарного градиента пикселя обрабатываемого изображения. В третьем слое полученные результаты складываются между собой в рамках области, соответствующей размеру изображения, на котором осуществлялось обучение (операция свертки). В зависимости от установленного процента распознавания можно судить о наличии объекта интереса (пешехода) в области.

Экспериментальные исследования

Реализованные модели ПВС с привлечением языка System Verilog на аппаратуре FPGA Intel Arria 10 показали, что длительность вычисления дескрипторов HOG в слое ПВС не превышает 20 нс. Ближайшая по тематике работа [20], описывающая более классический подход к обработке изображения, показывает результат в 87 мкс.

Реализованная модель интегрирована в систему технического зрения (СТЗ) оценки дорожной ситуации БТС (рис. 6). Она обеспечивает объезд препятствий и реагирование БТС на присутствие пешеходов. СТЗ вместе с системой управления БТС функционирует под управлением Robot Operating System (ROS). Комбинированная схема соединения компонентов БТС представлена на рис. 7.

На рис. 8 отражена последовательность операций, осуществляемых системой технического зрения макета БТС при реализации быстродействующего алгоритма определения присутствия человека на кадре, полученном с камеры.



Рис. 5. Пространственное представление предобученного вектора весов, формируемого классификатором SVM.



Рис. 6. Макет беспилотной транспортной системы.

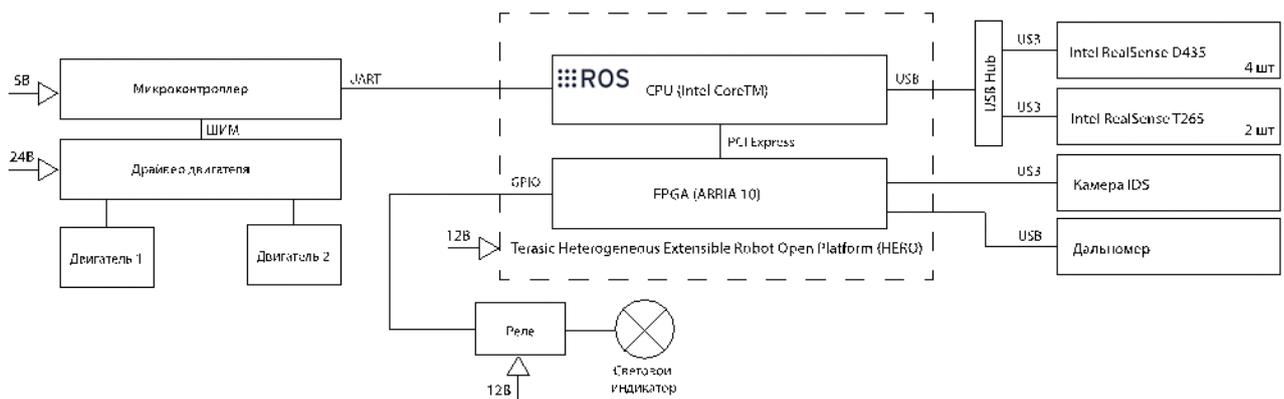


Рис. 7. Комбинированная схема комплекса.



Рис. 8. Принцип работы алгоритма распознавания человека на изображении.

Выводы

Работа открывает новое направление на стыке областей обработки изображений и вычислительных систем. Рассмотренная концепция заключается в том, что каждый пиксель изображения обрабатывается собственным специализированным вычислителем. Количество таких вычислителей сопоставимо с размером обрабатываемого изображения, а уровень описания закладываемых в них алгоритмов сопоставим с уровнем технологий, обеспечивающих взаимосвязь каждого активного чувствительного элемента (Active Pixel Sensor) видеосенсора с собственным ЭВ. Такой подход, с одной стороны, демонстрирует колоссальное увеличение производительности при обработке изображений, с другой стороны, увеличение требований к количеству транзисторов, расположенных на цельной кремневой пластине. Мировой опыт, описанный в работе, показы-

вает возможность реализации таких вычислителей, а предлагаемый подход в использовании однотипных ЭВ (принцип однородности) позволяет обходить неисправные участки на кремневой пластине, вызванные технологическим несовершенством.

Таким образом, просматривается возможность создания специализированных камер с низкими массогабаритными характеристиками, обеспечивающих скоростную обработку изображений. Интегрирование подобных камер на борт БТС позволит повысить автономность таких средств и снизить их массогабаритные характеристики.

Литература

1. K. Aizawa, K. Sakaue, Y. Suenaga
Image Processing Technologies. Algorithms, Sensors and Applications, USA, NY, New-York, Marcel Dekker, 2004, 282 pp.
2. D.G. Bailey
Design for Embedded Image Processing on FPGAs, SG, Singapore, John Wiley & Sons, 2011, 482 pp.
3. M. Fularz, M. Kraft, A. Schmidt, A. Kasiński
Int. J. Adv. Robot. Syst., 2015, 12, 1. DOI: 10.5772/61434.
4. P. Garcia-Risueno, P.E. Ibanez
Int. J. Mod. Phys., 2012, 23(7), 1230001.
DOI: 10.1142/S0129183112300011.
5. S. Saxena, N. Sharma, S. Sharma
Int. J. Adv. Res. Comp. Commun. Engin., 2013, 2(4), 1896.
DOI: 10.17148/IJARCCSE.2013.2420.
6. И.А. Каляев, И.И. Левин, Е.А. Семерников, В.И. Шмойлов
Реконфигурируемые мультимедийные вычислительные структуры, РФ, Ростов-на-Дону, ЮНЦ РАН, 2008, 393 с.
7. М.С. Кочерга, В.И. Шмойлов
Вестник ЮНЦ РАН, 2008, 4(2), 18.
8. А. Коновальчик
Современные технологии автоматизации, 2013, №3, 70.
9. Y. Jiang, S. Liu, H. Zhang, X. Kong
Optics Communications, 2014, 332, 359.
DOI: 10.1016/J.OPTCOM.2014.07.038.
10. C. Shi, J. Yang, Y. Han, Z. Cao, Q. Qin, L. Liu, N.-J. Wu, Z. Wang
В Proc. 2014 IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), 2014, 57, 128.
DOI: 10.1109/ISSCC.2014.6757367.
11. В.М. Хачумов, А.Ю. Попков, И.В. Соченков
В Сб. тез. докл. Третьего национального суперкомпьютерного форума (НСКФ-2014). РФ, Переславль-Залесский, ИПС имени А.К. Айламазяна РАН, 2014, с. 13–17.
12. N. Jouppi, C. Young, N. Patil, D. Patterson, G. Agrawal, R. Bajwa, S. Bates, S. Bhatia, N. Boden, A. Borchers, R. Boyle, P. Cantin, C. Chao, C. Clark, J. Coriell, M. Daley et al.
В 2017 ACM/IEEE 44th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA), 2017, 1.
DOI: 10.1145/3079856.3080246.
13. S. Lie
IEEE Micro, 2023, 43(3), 18. DOI: 10.1109/MM.2023.3256384.
14. S. Chun, T. Kuo, H. Tsai, C. Liu, C. Wang, J. Hsieh, T. Lin, T. Ku, D.C. Yu
В 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), USA, FL, Orlando, 2020, pp. 1–6.
DOI: 10.1109/ECTC32862.2020.00013.
15. N. Dey, G. Gosal, H. Khachane, W. Marshall, R. Pathria, M. Tom, J. Hestness
arXiv:2304.03208, 2023, 1. DOI: 10.48550/arXiv.2304.03208.
16. E. Talpes, D.D. Sarma, D.F. Williams, S. Arora, T. Kunjan, B. Floering, A. Jalote, C. Hsiong, C. Poorna, V. Samant, J. Sicilia, A.K. Nivarti, R. Ramachandran, T. Fischer, B. Herzberg, B. McGee et al.
IEEE Micro, 2023, 43(3), 31. DOI: 10.1109/MM.2023.3258906.
17. Д.В. Шашев, А.С. Бондарчук
Вестник ТГУ. Управление, вычислительная техника и информатика, 2023, 65, 116. DOI: 10.17223/19988605/65/12.
18. D.V. Shashev, A.A. Taganov, M. Mondal, M.V. Okunsky
J. Phys.: Conf. Ser., 2020, 1611, 012070.
DOI: 10.1088/1742-6596/1611/1/012070.
19. A.S. Bondarchuk, D.V. Shashev, S.V. Shidlovskiy
В Proc. Distributed Computer and Communication Networks: 24th International Conference, DCCN 2021 (RF, Moscow, 20–24 September, 2021), Ser. Communications in Computer and Information Science (CCIS), Eds V.M. Vishnevskiy, K.E. Samouylov and D.V. Kozyrev, FRG, Cham, Springer, 2022, 1552, pp. 408–419. DOI: 10.1007/978-3-030-97110-6_32.

20. N. Attarmoghaddam, K.F. Li
IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs,

2022, 69(4), 2306.
DOI: 10.1109/TCSII.2022.3148228.

English

Development and Research of Reconfigurable High-Speed Image Recognition Algorithms for Traffic Situation Assessment Based on Specialized Mobile Devices with Parallel-Pipeline Architecture*

Stanislav V. Shidlovskiy

Tomsk State University
36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia
shidlovskiysv@mail.ru

Dmitry V. Shashev

Tomsk State University
36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia
dshashev@mail.tsu.ru

Anton S. Bondarchuk

Tomsk State University
36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia
bondarchuk.a.c@gmail.com

Vladislav V. Shatravin

Tomsk State University
36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia
shatravin@stud.tsu.ru

Mihail V. Okunskiy

Tomsk State University
36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia
iamleftbrain@gmail.com

Abstract

The article summarizes the results of studying the use of reconfigurable computing environments for image processing tasks obtained on board unmanned transport systems. A new approach was proposed to the development of specialized, high-speed algorithms for recognizing images of a road scene, designed for hardware execution on computers with a parallel-pipeline architecture based on the model of reconfigurable computing environments.

The architecture and algorithmic tooling of such environments for traffic situation assessment problems are considered. A new class of image recognition algorithms based on the calculation of LBP, HOG descriptors and the SVM classifier has been formed. It is shown that calculations of HOG descriptors in the layer of a reconfigurable computing environment are performed in one machine cycle for the entire image, and the execution time, when implemented on an Intel Arria 10 FPGA, does not exceed 20 ns.

Keywords: high-performance computing systems, parallel computing, reconfigurable computing environments, driverless vehicles.

*The work was financially supported by RFBR (project 19-29-06078).

Images & Tables

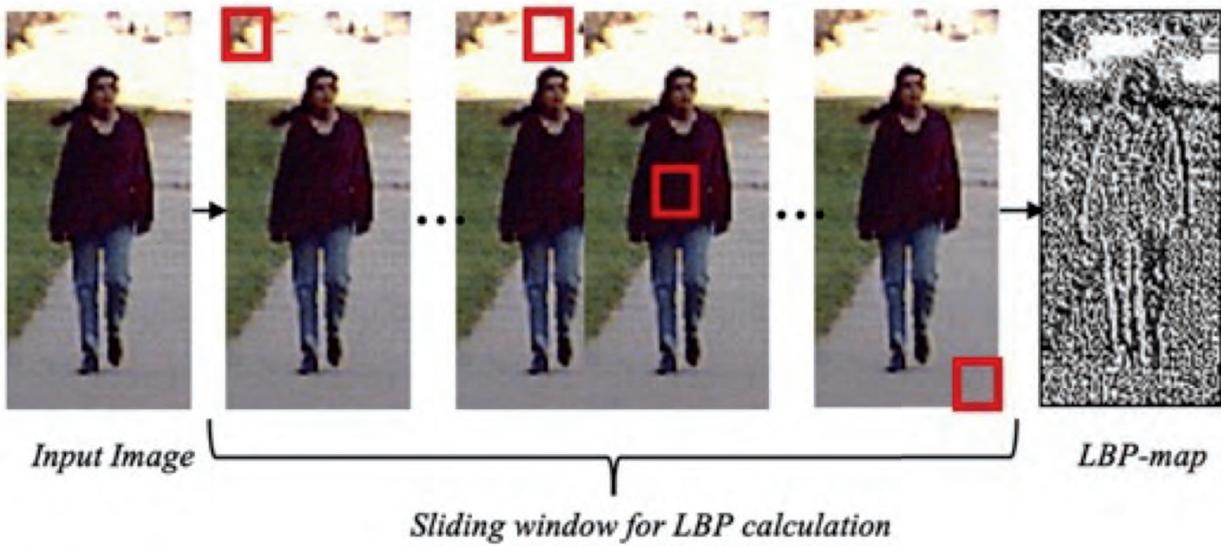
Table 1. Encoding binary gradient direction values

φ	«No gradient»	180°	225°	270°
φ_1	0	0	1	1
φ_2	0	1	0	1



Fig. 1. Wafer-Scale Engine 2 M.

Classic LBP



LBP for RCE

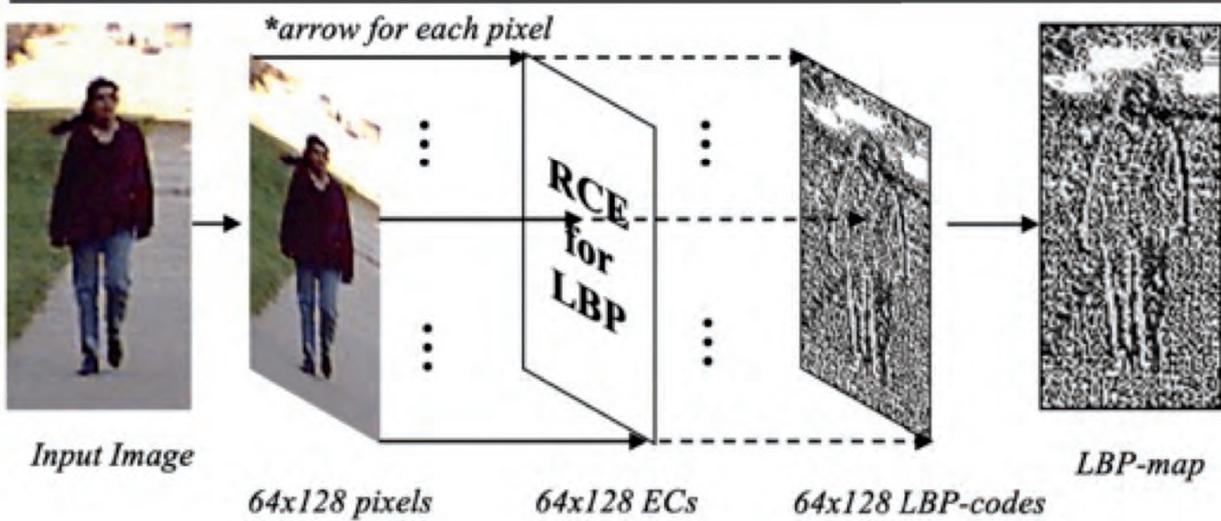


Fig. 2. Classic and proposed methods for finding the LBP descriptor.

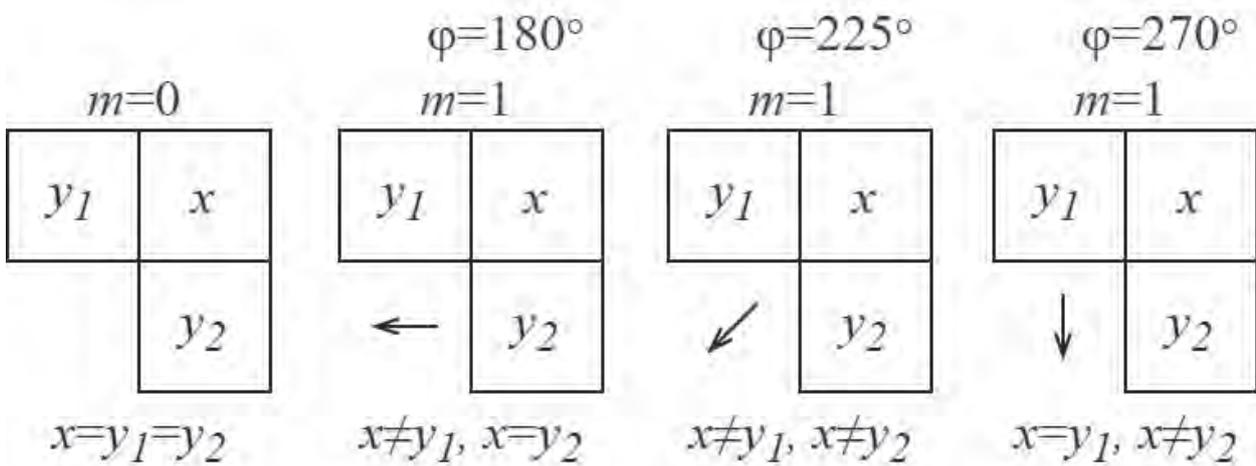


Fig. 3. Binary Gradient Value Options.

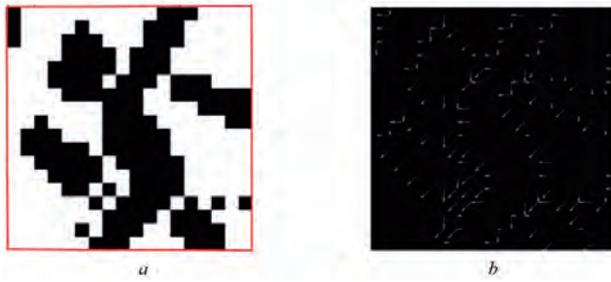


Fig. 4. Visualization of a binary gradient in an image: a – original binary image, b – visualization of a binary gradient in each pixel of the image.

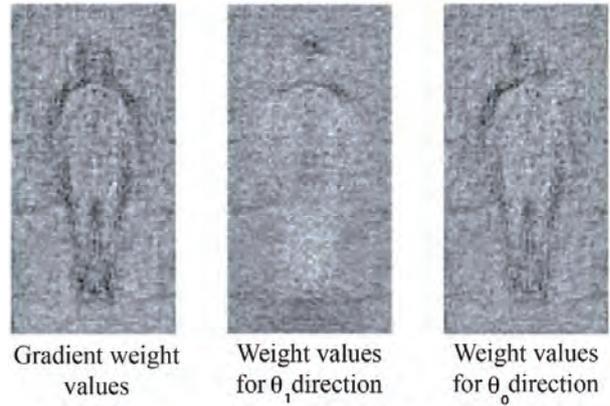


Fig. 5. Spatial representation of the pre-trained vector of weights generated by the SVM classifier.



Fig. 6. Model of an unmanned transport system.

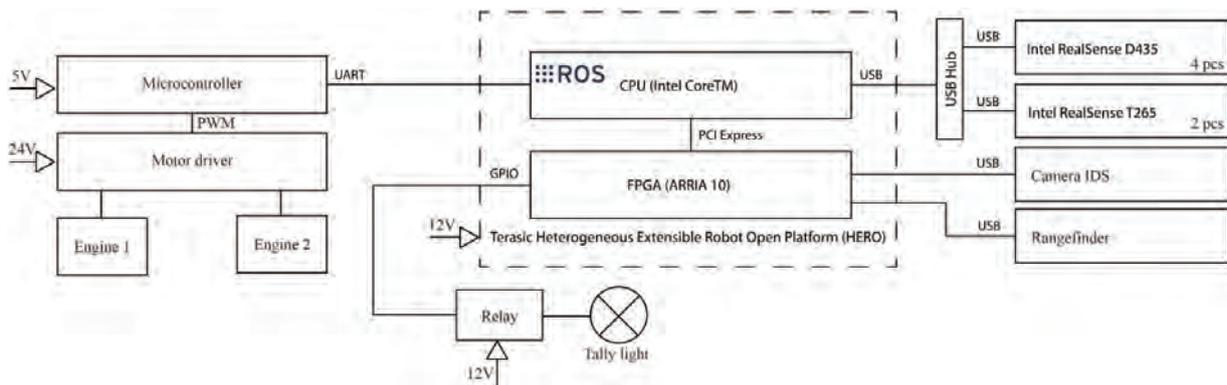


Fig. 7. Combined scheme of the complex.



Fig 8. The principle of operation of the algorithm for recognizing a person in an image.

References



1. **K. Aizawa, K. Sakaue, Y. Suenaga**
Image Processing Technologies. Algorithms, Sensors and Applications, USA, NY, New-York, Marcel Dekker, 2004, 282 pp.
2. **D.G. Bailey**
Design for Embedded Image Processing on FPGAs, SG, Singapore, John Wiley & Sons, 2011, 482 pp.
3. **M. Fularz, M. Kraft, A. Schmidt, A. Kasiński**
Int. J. Adv. Robot. Syst., 2015, **12**, 1. DOI: 10.5772/61434.
4. **P. Garcia-Risueno, P.E. Ibanez**
Int. J. Mod. Phys., 2012, **23**(7), 1230001.
DOI: 10.1142/S0129183112300011.
5. **S. Saxena, N. Sharma, S. Sharma**
Int. J. Adv. Res. Comp. Commun. Engin., 2013, **2**(4), 1896.
DOI: 10.17148/IJARCCCE.2013.2420.
6. **I.A. Kalyaev, I.I. Levin, E.A. Semernikov, V.I. Shmoilov**
Reconfigurable Multi-Pipeline Computing Structures [Rekonfiguriruemye multikonveyernye vychislitelnye struktury], RF, Rostov-on-Don, SSC RAS, 2008, 393 pp. (in Russian).
7. **M.S. Kocherga, V.I. Shmoilov**
Vestnik UNTs RAN [Bulletin of South Scientific Centre of RAS], 2008, **4**(2), 18. (in Russian).
8. **A. Konovalchik**
Modern Automation Technologies [Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii], 2013, **3**, 70. (in Russian).
9. **Y. Jiang, S. Liu, H. Zhang, X. Kong**
Optics Communications, 2014, **332**, 359.
DOI: 10.1016/J.OPTCOM.2014.07.038.
10. **C. Shi, J. Yang, Y. Han, Z. Cao, Q. Qin, L. Liu, N.-J. Wu, Z. Wang**
In Proc. 2014 IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), 2014, **57**, 128.
DOI: 10.1109/ISSCC.2014.6757367.
11. **V.M. Khachumov, A.Yu. Popkov, I.V. Sochenkov**
In Proc. National Supercomputing Forum (NSCF-2020) [Sbornik tezisov dokladov Tretego Nacionalnogo Superkompyuternogo Foruma (NSKF-2014)]. RF, Pereslavl-Zalessky, Program Systems Institute of the RAS, 2014, pp. 13–17 (in Russian).
12. **N. Jouppi, C. Young, N. Patil, D. Patterson, G. Agrawal, R. Bajwa, S. Bates, S. Bhatia, N. Boden, A. Borchers, R. Boyle, P. Cantin, C. Chao, C. Clark, J. Coriell, M. Daley et al.**
In 2017 ACM/IEEE 44th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA), 2017, 1.
DOI: 10.1145/3079856.3080246.
13. **S. Lie**
IEEE Micro, 2023, **43**(3), 18. DOI: 10.1109/MM.2023.3256384.
14. **S. Chun, T. Kuo, H. Tsai, C. Liu, C. Wang, J. Hsieh, T. Lin, T. Ku, D.C. Yu**
In 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), USA, FL, Orlando, 2020, pp. 1–6.
DOI: 10.1109/ECTC32862.2020.00013.
15. **N. Dey, G. Gosal, H. Khachane, W. Marshall, R. Pathria, M. Tom, J. Hestness**
arXiv:2304.03208, 2023, 1. DOI: 10.48550/arXiv.2304.03208.
16. **E. Talpes, D.D. Sarma, D.F. Williams, S. Arora, T. Kunjan, B. Floering, A. Jalote, C. Hsiang, C. Poorna, V. Samant, J. Sicilia, A.K. Nivarti, R. Ramachandran, T. Fischer, B. Herzberg, B. McGee et al.**
IEEE Micro, 2023, **43**(3), 31. DOI: 10.1109/MM.2023.3258906.
17. **D.V. Shashev, A.S. Bondarchuk**
Tomsk State University Journal of Control and Computer Science [Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika], 2023, **65**, 116 (in Russian). DOI: 10.17223/19988605/65/12.
18. **D.V. Shashev, A.A. Taganov, M. Mondal, M.V. Okunsky**
J. Phys.: Conf. Ser., 2020, **1611**, 012070.
DOI: 10.1088/1742-6596/1611/1/012070.
19. **A.S. Bondarchuk, D.V. Shashev, S.V. Shidlovskiy**
In Proc. Distributed Computer and Communication Networks: 24th International Conference, DCCN 2021 (RF, Moscow, 20–24 September, 2021), Ser. Communications in Computer and Information Science (CCIS), Eds V.M. Vishnevskiy, K.E. Samouylov and D.V. Kozyrev, FRG, Cham, Springer, 2022, **1552**, pp. 408–419.
DOI: 10.1007/978-3-030-97110-6_32.
20. **N. Attarmoghaddam, K.F. Li**
IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, **69**(4), 2306. DOI: 10.1109/TCSII.2022.3148228.

Психофизиологические предикторы качества управления симулятором вождения автомобиля на фоне хронической депривации сна*

О.Н. Ткаченко, В.Б. Дорохов, В.В. Дементиев, Е.О. Гандина,
Г.Н. Арсеньев, А.О. Таранов, А.Н. Пучкова, Д.С. Свешников

Исследовался декремент бдительности водителей во время управления симулятором вождения автомобиля. Проведена оценка психофизиологических предикторов декремента бдительности, а также проверка двух неинвазивных техник снижения сонливости на фоне хронической депривации сна: вибромассажной накидки на кресло и эфирного масла мяты перечной.

В исследовании проведены эксперименты с симулятором вождения автомобиля на 18 здоровых испытуемых с частичной депривацией сна. Регистрировались видеозапись лица испытуемого, электроэнцефалограмма (ЭЭГ), электрокардиограмма (ЭКГ) и кожно-гальваническая реакция (КГР). Испытуемые протестированы на сонливость, общее самочувствие и время реакции.

Установлено, что испытуемые, которые находились в состоянии хронической депривации сна и хронического стресса, в среднем допускали 2.2 (от 0 до 7) ошибки за эксперимент. При этом около 20% ошибок испытуемых, по оценкам экспертов, вызвано отвлечением, а не засыпанием. Сделаны выводы о зависимости уровня внимания и сонливости от нескольких факторов и необходимости дальнейших исследований. На основании экспериментальных данных разработан список рекомендаций для конструирования систем мониторинга состояний водителя.

Ключевые слова: водители, частично автоматизированное вождение, ЭКГ, ЭЭГ, КГР, видеотрекинг, операторская деятельность, декремент бдительности.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-29-06071).

Введение

В результате революции в производительности компьютеров появилась возможность внедрять многие техники так называемого машинного

обучения в повседневную жизнь, всё больше автоматизируя рутинные процедуры, которые раньше требовали участия человека. Так возникла и концепция «умного города», в котором многие инфраструктурные процессы находятся под частичным или полным управлением высокоавтоматизированных систем. Одной из областей инфраструктуры, ко-



ТКАЧЕНКО
Ольга Николаевна
Институт высшей деятельности и нейрофизиологии РАН



ДОРОХОВ
Владимир Борисович
профессор,
Институт высшей деятельности и нейрофизиологии РАН



ДЕМЕНТИЕВ
Валерий Васильевич
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН



ГАНДИНА
Евгения Олеговна
Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН



АРСЕНЬЕВ
Глеб Николаевич
Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН



ТАРАНОВ
Антон Олегович
Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН



ПУЧКОВА
Александра Николаевна
Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН



СВЕШНИКОВ
Дмитрий Сергеевич
Медицинский институт, Российский университет дружбы народов

торая уже сейчас может быть частично автоматизирована, является автомобильный трафик.

По данным Всемирной организации здравоохранения, аварийность на дорогах приводит к гибели около 1.3 млн людей в год, а травмы и ранения в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) получают 20–50 млн человек ежегодно [1]. Человеческий фактор является основной причиной аварий приблизительно в 90% случаев, причем приблизительно в 20–25% аварию вызывает засыпание за рулем, а еще в 20% – отвлечение от вождения, например, на мобильные телефоны [2, 3]. Самый интенсивный автомобильный трафик наблюдается в мегаполисах, жители которых страдают от светового загрязнения, хронической депривации сна и высокого уровня стресса. Так, согласно исследованию, проведенному компанией *Amazfit* в 2021 г. на 2.9 млн респондентов [4], средняя продолжительность сна жителей России составляет менее 7 часов в сутки, причем Москва и Московская область входят в тройку худших по этому показателю регионов. Согласно некоторым исследованиям, ограничение сна до 6 часов в сутки повышает риск заснуть за рулем в 2.6 раза, а менее четырех часов сна перед вождением – в 15 раз [5].

По данным *Euromonitor International* [6], в 2023 г. ожидается рост продаж частично автоматизированных автомобилей, которые берут на себя управление в рутинных ситуациях, на 216% по сравнению с 2022 г. Показано, что внимательность в полуавтоматических транспортных средствах снижается быстрее по сравнению с полностью ручным управлением, а сонливость нарастает в течение 20–30 минут [7, 8].

Физиологические механизмы монотонии, снижения внимания и засыпания при возникновении эффекта декремента бдительности человека до сих пор исследованы недостаточно [9]. Несмотря на множество исследований и значительное число патентов в этой сфере, большинство исследований внимания и сонливости ограничивается изучением одного-двух психофизиологических показателей, а длительность исследования чаще всего составляет один час и менее. Критерии оценки уровня внимания или сонливости также значительно различаются, что не позволяет составить комплексную картину состояния водителя.

Исследование литературы о борьбе с эффектами монотонии [10] показывает, что для улучшения уровня внимания и качества монотонной деятельности могут быть применены различные способы, в том числе вибромассажные накидки на кресло [11] или распыление эфирных масел, в частности, мятного [12].

Целью нашего исследования было изучить возможности контроля внимания и сонливости водителя высокоавтоматизированных транспортных средств в модельных условиях, приближенных к условиям «умного города», по психофизиологическим показателям, а также выяснить эффективность двух неинвазивных способов снижения сонливости и улучшения качества вождения.

Задачами исследования были:

– оценка возможности предсказания качества управления симулятором вождения автомобиля по предшествую-

щему тестированию на время сенсорной реакции, времени сна в ночь перед экспериментом и субъективной оценке состояния;

– проверка эффективности воздействия массажной вибронакидки и распыления мятного масла посредством аромадиффузора для повышения качества управления симулятором вождения автомобиля;

– выработка рекомендаций для конструирования систем мониторинга состояний водителя.

Методика

Симулятор управления автомобилем

Компьютерный симулятор вождения автомобиля (далее «симулятор») представлял собой комбинацию компьютера (диагональ монитора 17 дюймов), компьютерного кресла с подголовником и игрового руля с педалями. Изображение на мониторе представляло собой стилизованный вид на четырехполосную дорогу, разделенную пунктирной разметкой. В отсутствие стимулов «автомобиль» не требовал управления от испытуемого и двигался по центру второй справа полосы со скоростью 60 км/ч. Испытуемый получал управление только в промежутки времени, когда от него требовалась реакция на событие.

Время между событиями случайным образом варьировало от 3 до 7 мин, в среднем – 5 мин, распределение времен на этом промежутке – равномерное. Последовательность событий в начале каждой экспериментальной сессии задавалась случайным образом.

В ходе движения могли происходить следующие события (по 9 событий каждого типа в одной экспериментальной сессии):

– событие 1: постепенное покраснение одной полосы дороги, испытуемый должен был свернуть на соседнюю полосу;

– событие 2: появление перед автомобилем неподвижного препятствия в виде стилизованной фигурки пешехода на расстоянии 30 м; испытуемый должен был затормозить.

Испытуемые

Для исследования были выбраны студенты в возрасте 18–22 года без диагностированных проблем со зрением, острых или хронических заболеваний, с небольшим или отсутствующим стажем вождения (до 4 лет). Согласно метаобзору [13], чем старше водитель и больше стаж вождения, тем он в среднем менее уязвим для сонливости, поэтому на молодых водителях эффект должен был проявиться более отчетливо.

Процедура эксперимента

Каждый испытуемый принял участие в четырех экспериментах:

1. Эксперимент типа 0, без депривации сна: обучающая сессия в симуляторе, регистрация фоновых показателей, длительность – 15 минут.
2. Эксперимент типа 1, с депривацией сна: не более 4 часов сна в ночь перед экспериментом, длительность – 90 мин.
3. Эксперимент типа 2, с депривацией сна: не более 4 часов сна в ночь перед экспериментом и активация массажной вибронакидки на кресло раз в 10 минут, длительность – 90 мин.
4. Эксперимент типа 3, с депривацией сна: не более 4 часов сна в ночь перед экспериментом и включение ароматиффузора с маслом мяты перечной раз в 10 минут, длительность – 90 мин.

Эксперименты проводили в дневное время, с 13 до 16 часов, чтобы сессия в симуляторе приходилась на время наивысшей дневной сонливости. До и после эксперимента они заполняли опросник «САН» (самочувствие – активность – настроение). Кроме того, перед экспериментом тестировали время реакции испытуемого на простые и усложненные неправильными подсказками стимулы на аппаратно-программном комплексе УПДК-МК (производство АО «Нейроком») [1]. Время сна в ночь перед экспериментом оценивалось экспертом по показаниям актиграфов производства компании Condor Instruments.

Во время эксперимента регистрировали: ЭЭГ от 19 отведений по стандартной схеме 10–20, ЭКГ и кожно-

гальваническую реакцию (КГР) от монополярных отведений. Также на мониторе была закреплена видеокамера, отслеживающая положение головы, моргания и закрытие глаз испытуемым на протяжении эксперимента. Данные с симулятора вождения содержали координаты автомобиля, скорость, ускорение, угол поворота руля и информацию о событиях.

До и после каждого эксперимента регистрировали фоновые физиологические показатели: две минуты в положении сидя с открытыми глазами и две – с закрытыми глазами.

Вычисление показателей сонливости из физиологических данных

Предварительная обработка и анализ данных проводились в программно-вычислительной среде Python Anaconda.

Вычисление индекса закрытия глаз PERCLOS. Видеоизображение лица испытуемого анализировалось покaдрово с применением стандартной библиотеки компьютерного зрения OpenCV. Закрытием глаз считались промежутки времени, когда расстояние между веками составляло менее $\frac{1}{4}$ от медианного значения, включая как моргания, так и длительные закрытия глаз. Показатель PERCLOS вычислялся как доля времени с закрытыми глазами на протяжении предыдущей минуты.

Для ЭЭГ вычислялись спектральные характеристики в нескольких диапазонах частот.

Для вариабельности сердечного ритма (BCP) проводился спектральный анализ расстояний между сокращениями сердца и вычислялся показатель соотношения низких и высоких частот (0.04–0.15 Гц и 0.15–0.5 Гц), который отражает тонус симпатической нервной системы.

Для КГР вычислялись промежутки между соседними моментами микровыбросов пота потовыми железами, что отражается в сигнале кратковременным скачком сопротивления кожи (так называемая фазическая компонента КГР). Согласно стандартам, разработанным АО «Нейроком» и утвержденным для машинистов поездов, в бодрствовании промежутки между соседними фазическими компонентами должен составлять не более 60 секунд. Удлинение интервала свидетельствует о декаде бдительности и нарастающей сонливости.

Результаты

В соответствии с задачами исследования нами получена оценка возможности предсказания качества управления симулятором вождения автомобиля по предшествующему тестированию на время сенсомоторной реакции, по времени сна в ночь перед экспериментом и субъективной оценке состояния. Проверена также эффективность воздействия массажной вибронакидки и распыления мятного масла посредством ароматиффузора для повышения качества управления симулятором вождения автомобиля.

Ошибки, связанные с засыпанием и отвлечением

В среднем испытуемые совершали 2.22 ± 2.10 ошибки за 1.5 часа эксперимента (от 0 до 7). При этом в экспериментах

без дополнительных воздействий испытуемые совершали в среднем 1.95 ошибки, в экспериментах с вибронакидкой – 2.50 ± 2.18 ошибки, с мятым маслом – 2.55 ± 1.98 ошибки (табл. 1). Различия не достигли уровня статистической значимости из-за большого разброса, но ни вибромассажная накидка, ни распыление мятного масла в среднем не улучшили эффективность управления симулятором вождения автомобилем.

Эксперты оценивали физиологические показатели испытуемых и видеозапись лица испытуемого за 15 с до ошибок. В 22% случаев физиологические показатели не свидетельствовали о засыпании, то есть предположительно были вызваны отвлечением.

В таблице 1 приведены количество ошибок в симуляторе вождения автомобиля и показатели реакции на два типа событий в зависимости от типа воздействия в эксперименте. Звездочками отмечены статистически значимые отличия. Времена реакции на два типа событий не коррелировали между собой.

С количеством ошибок в симуляторе вождения автомобиля положительно коррелировало среднее время реакции на плавно появляющееся препятствие ($r=0.71$, $p<0.001$). Значимая корреляция сохранялась и при анализе опытов с разными типами воздействия по отдельности (без воздействия $r=0.67$, $p<0.05$; вибронакидка – $r=0.75$, $p<0.01$; мятное масло – $r=0.88$, $p<0.001$). Можно предположить, что ошибки при появлении быстрого препятствия были в большой степени обусловлены замедлением времени реакции.

Опросник САН (Самочувствие, Активность, Настроение)

До и после эксперимента испытуемые проходили опросник из 30 вопросов, по которому оценивались их самочувствие, активность и настроение. Баллы по шкале Самочувствия положительно коррелировала с баллами по шкале Настроения ($r=0.76$, $p<0.001$ до эксперимента; $r=0.77$, $p<0.001$ после эксперимента), и отрицательно – с баллами по

шкале Активность ($r=-0.74$, $p<0.001$ до опыта; $r=-0.89$, $p<0.001$), то есть чем более активны были испытуемые, тем хуже они себя чувствовали и оценивали свое настроение. Вместе со сниженными средними баллами по всем шкалам (менее 4) такая динамика характерна для хронического стресса и активации организма за счет повышенной активности симпатической нервной системы.

Оценка сонливости и время сна

Перед короткими экспериментами без депривации сна время сна испытуемых составило в среднем 407 ± 23 мин (от 5 до 8 часов, в среднем около 6.7 ч). В экспериментах с депривацией сна, где от испытуемых требовалось проспать четыре часа – 255 ± 10 минут (без воздействия), 246 ± 14 мин (вибронакидка), 241 ± 13 мин (мятное масло).

Перед началом эксперимента испытуемые оценивали свою сонливость по шкале от 1 до 7. В контрольных экспериментах без депривации сна среднее составило 4.2 ± 1.3 , в экспериментах с депривацией и без воздействия – 5.23 ± 2.49 ; в экспериментах с вибронакидкой – 5.56 ± 2.42 ; в экспериментах с мятым маслом – 5.39 ± 1.40 . Таким образом, перед экспериментами с регистрацией фона испытуемые спали недостаточно и демонстрировали высокую сонливость.

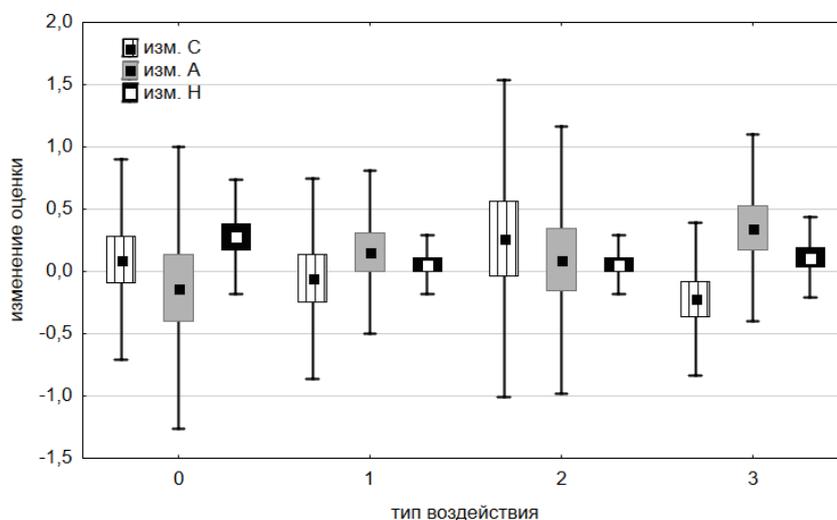


Рис. 1. Разность шкал Самочувствия (С), Активности (А) и Настроения опросника САН после эксперимента и до эксперимента. По оси X приведены типы эксперимента: 0 – 15-минутная тренировочная сессия; 1 – с депривацией сна, 2 – с депривацией сна и воздействием вибромассажной накидки; 3 – с депривацией сна и воздействием мятного масла.

Таблица 1. Ошибки и времена реакции на события в экспериментах

Параметр	Событие в эксперименте					
	без воздействия		вибронакидка		мятное масло	
	среднее	станд. откл.	среднее	станд. откл.	среднее	станд. откл.
Количество ошибок	1.95	1.10	2.42	2.18	2.55	1.98
Время реакции на покраснение дороги, с	2.38	0.83	2.65	1.04	3.08	1.36
Дистанция остановки перед пешеходом, м	1.60	0.31	2.21*	1.10	2.30*	1.56

* Статистически значимые отличия от первого эксперимента без воздействия, $p < 0.01$.

Таблица 2. Изменения индекса вариабельности сердечного ритма (значения средних и стандартных ошибок)

Время измерения индекса ВСР	Вид воздействия					
	без воздействия		вибронакидка		мятное масло	
	среднее	станд. ошибка.	среднее	станд. ошибка.	среднее	станд. ошибка
В первые две минуты работы	3.22	1.94	3.40	2.24	4.20	2.56
В течение минуты перед ошибкой	12.78*	7.15	13.36*	14.42	11.86*	5.72
За всё время работы	4.45	2.18	4.84	1.76	4.76	1.65

* Значимые отличия от значений в начале эксперимента ($F(1;70)=52.5, p > 0.0001$).

Субъективная оценка сонливости не коррелировала с реальным временем сна накануне. Однако количество сна коррелировало с другими субъективными параметрами перед началом опыта: с активностью ($r=0.31, p < 0.05$) до опыта и всеми оценками после опыта (Самочувствие: $r=-0.33, p < 0.01$, Активность: $r=0.39, p < 0.05$, Настроение: $r=-0.42, p < 0.01$), что подтверждает версию о стрессовой активации испытуемых перед экспериментом.

Время реакции в предварительном тестировании

Перед началом эксперимента испытуемые проходили тестирование на простую сенсомоторную реакцию и сенсомоторную реакцию с дистрактором на Универсальном психодиагностическом комплексе УПДК-МК. Ни время реакции, ни количество ошибок в среднем не изменились от опыта к опыту, и депривация сна не оказала влияния на выполнение этих тестов. Это подтверждает гипотезу о том, что испытуемые приходили на тренировочный эксперимент недостаточно выспавшимися и отдохнувшими и различия между тренировочным и основным экспериментами, скорее всего, будут смазаны.

Количество ошибок в предварительном тестировании на аппаратно-программном комплексе УПДК-МК составило в среднем 3.8 ошибки в тесте на простую сенсомоторную реакцию и 3.15 в тесте на сенсомоторную реакцию с дополнительным стимулом, что говорит о низком уровне внимания испытуемых уже в начале работы.

Время простой сенсомоторной реакции в тесте УПДК-МК отрицательно коррелирует с показателем Активность по опроснику САН перед экспериментом ($r=-0.27, p < 0.05$ – с активностью до опыта) и положительно – с показателем Настроение после эксперимента ($r=0.40, p < 0.01$). Значимой связи сенсомоторной реакции со временем сна в ночь перед экспериментом обнаружено не было, что также свидетельствует в пользу воздействия на испытуемых двух противоположных факторов: давления сонливости и стрессовой активации.

Индекс вариабельности сердечного ритма (ВСР)

Индекс ВСР отражает медленные изменения в балансе активности симпатической и парасимпатической нервной системы. В таблице 2 приведены значения средних и стандартных ошибок индекса ВСР в экспериментах с различными типами воздействия. Звездочками отмечены значимые отличия от значений в начале эксперимента ($F(1;70)=52.5, p > 0.0001$).

Во всех экспериментах, включая контрольный без депривации сна, наблюдалось постепенное повышение этого параметра, не достигающее уровня статистической значимости. Во всех опытах в течение минуты перед совершением ошибки наблюдалось крайне выраженное и значимое повышение этого параметра по сравнению с началом эксперимента, что свидетельствует о значительной активации симпатической нервной системы. Различия в индексе ВСР между периодом

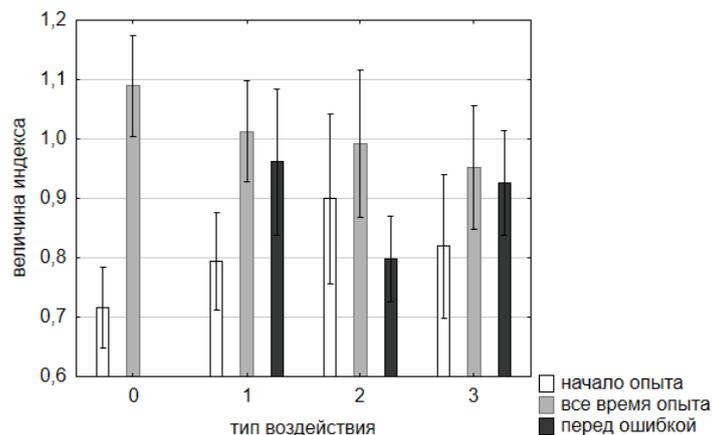


Рис. 2. Средние стандартные ошибки индекса соотношения мощностей в диапазонах альфа/бета в опытах с различным типом воздействия: 0 – тренировочный эксперимент; 1 – без воздействия; 2 – воздействие вибранакидки; 3 – воздействие запаха эфирного масла мяты перечной.

перед ошибкой и всем временем работы были наибольшими в эксперименте с вибранакидкой, хотя в целом значения оказались сходными для всех типов экспериментов. Наблюдался значительный разброс данных в зависимости от испытуемого, что видно по значениям стандартной ошибки.

Анализ электроэнцефалограммы

Из 20 испытуемых у 5 альфа-ритм был выражен слабо. Для сравнения параметров ЭЭГ использовались данные наиболее информативных для ситуации операторской работы и засыпания диапазонов: тета (4–7 Гц), альфа (8–13 Гц) и бета (14–30 Гц). Были выбраны следующие коэффициенты соотношений спектральной мощности диапазонов: альфа к тета, альфа к бета, тета к бета [15]. Проводилось сравнение этих коэффициентов в первые две минуты работы в симуляторе, за всё время работы и за 15 секунд до совершения ошибки.

1. Альфа/бета. За время эксперимента у испытуемых значимо возрастало значение индекса альфа/бета, что свидетельствует о постепенном расслаблении и снижении уровня внимания: дисперсионный анализ с повторными измерениями, разность начало эксперимента/весь эксперимент: $F(1;70)=18.9, p<0.0001$. Средние значения индекса для различных типов воздействия представлены на рис. 2. Различия в экспериментах без воздействия и с воздействием не достигали уровня статистической значимости из-за присутствия в выборке испытуемых с плоским альфа-ритмом.

Таким образом, основным результатом является повышение индекса альфа/бета в ходе эксперимента, что свиде-

тельствует о расслаблении и снижении уровня внимания. Тета-ритм, однако, демонстрировал более сложную динамику, несводимую к динамике сонливости и снижению уровня бдительности.

2. Альфа/тета. Для индекса альфа/тета также было выражено различие между началом и всем временем опыта, однако различия не достигли уровня статистической значимости.

Усиление альфа-ритма сопровождается усилением сонливости, расслабление и отвлечение от задания, и увеличение индексов альфа/тета и альфа/бета от начала работы к средним за всё время работы показателям отражает эти процессы.

3. Тета/бета. Падение индекса за время работы оказалось менее выраженным в опытах с депривацией сна, чем в контрольном опыте, где этот индекс был самым высоким (дисперсионный анализ с повторными измерениями, контраст начало работы/вся работа $F(1;70)=8.8, p<0.01$). Мы полагаем, что в данном случае дополнительная тета-активность, которая

Таблица 3. Изменения индекса уровня закрытия глаз (значения средних и стандартных ошибок)

Время измерения PERCLOS	Вид воздействия					
	без воздействия		вибранакидка		мятное масло	
	среднее	станд. откл.	среднее	станд. откл.	среднее	станд. откл.
В начале работы	0.13	0.074	0.11	0.052	0.12	0.06
За всё время работы	0.13	0.06	0.12	0.054	0.12	0.05
В течение минуты перед ошибкой	0.49*	0.44*	0.78*	0.38*	0.70*	0.35*

* Достоверные отличия при проведении дисперсионного анализа с повторными измерениями, $F(1;70)=71.36, p<0.001$.

является функциональной, была проявлением реакции на новую обстановку и не знакомый испытуемому эксперимент.

Индекс закрытия глаз (PERCLOS)

Средние и стандартные отклонения индекса закрытия глаз (PERCLOS) в разных экспериментах и экспериментальных условиях представлены в *табл. 3*; приведены значения индекса уровня закрытия глаз в опытах с различными типами воздействия.

Видно, что средние значения в начале эксперимента и в течение всего эксперимента значимо не различаются, то есть уровень бодрствования, согласно этому показателю, остается на высоком уровне. В то же время перед ошибками среднее значение значимо повышается (дисперсионный анализ с повторными измерениями, $F(1;70)=71.36$, $p<0.001$, выделено жирным шрифтом). Воздействия посредством массажной вибронакидки и мятного масла не оказывают значимого влияния на значение PERCLOS.

Кожно-гальваническая реакция (КГР)

Исчезновение фазической компоненты кожно-гальванической реакции в 85% случаев предшествовало первой ошибке испытуемого в эксперименте, однако после первой ошибки показывало сложный паттерн деактивации. Это соответствует картине, наблюдаемой в ЭЭГ: в пограничном состоянии между сном и бодрствованием наблюдаются нерегулярные колебания уровня внимания, которые могут быть быстрыми (порядка 10 секунд) и более медленными (порядка нескольких минут), когда физиологические показатели испытуемого, чувствительные к засыпанию, также нестабильны. Такое состояние, по нашим наблюдениям (в процессе публикации), может продолжаться приблизительно 10–30 минут и именно в этот период возникают основные ошибки.

Обсуждение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Предсказание качества управления по предшествующему тестированию и во время вождения

Мы сравнили количество допущенных испытуемыми ошибок с проведенной ранее серией экспериментов, в которой участники спали больше и по данным опросников не находились в состоянии хронического стресса [7]. Количество ошибок испытуемых в данном исследовании значительно возросло (2.22 ошибок на эксперимент по сравнению с $46/32=1.43$ в ранее выполненном исследовании [7]), что подчеркивает опасность депривации сна для качества вождения. Получено, что 22% от общего количества ошибок было вызвано отвлечением, а не засыпанием, это соответствует данным мировой литературы. Отсюда следует необходимость мониторинга не только степени сонливости испытуемого, но и его отвлечения от выполняемой задачи.

В отличие от прошлого исследования, у испытуемых была нарушена связь между реальным временем сна, субъективной сонливостью и самочувствием, что характерно для сочетания хронического недосыпа и стресса [16]. По косвенным признакам (тенденция к большему количеству ошибок под воздействием массажной вибронакидки и мятного масла), внимание к задаче поддерживалось за счет стресса, а качество вождения могло снижаться при расслаблении. Предсессионное тестирование выявило низкую внимательность испытуемых уже в начале эксперимента и подтверждало низкий уровень внимания испытуемых.

Индекс variability сердечного ритма (ВСР) отражает изменение активности симпатической и парасимпатической систем человека [17]. Резкое изменение этого показателя характерно для ситуаций засыпания. Так, в работе [18] перед засыпанием в спокойной обстановке наблюдается снижение спектрального индекса ВСР, используемого и в нашем исследовании, за 10 минут до засыпания. Однако если человек активно борется с засыпанием, у него усиливается активность симпатической нервной системы, что наблюдалось в случае нашего исследования. Спектральный индекс ВСР демонстрировал дополнительную активацию СНС в ходе работы по сравнению с началом опыта, что отражает стрессорное воздействие борьбы с сонливостью на испытуемых.

Показатель закрытия глаз PERCLOS хорошо проявляет себя при контроле уровня бодрствования и достоверно возрастает перед совершаемыми ошибками.

Кожно-гальваническая реакция и спектральные характеристики ЭЭГ человека показали сложную картину колебаний уровня внимания и бодрствования испытуемых после совершения первой ошибки. Так, альфа-ритм наиболее выражен в состоянии свободного бодрствования при внутреннем фокусе внимания и значительно возрастает при закрытии глаз. Тета-активность может быть связана

как с начальными стадиями засыпания (тогда одновременно снижается мощность альфа-ритма), так и с концентрацией на задаче и повышении когнитивного контроля [19, 20]. Бета-ритм в бодрствовании свидетельствует о сосредоточении на выполнении задачи, внешнем фокусе внимания. Динамика этих ритмов оказалась неоднозначной, что свидетельствует в пользу гипотезы о неустойчивом уровне внимания испытуемых, колебания которого не обязательно приводят к ошибкам.

По совокупности известных данных, при наступлении выраженной сонливости водителю целесообразно рекомендовать выпить чашку кофе, сделать несколько физических упражнений (эффект длится около 10–15 минут) или сделать короткий перерыв на сон (20–40 минут) [10].

Воздействие мятного масла и массажной вибромассажной накидки на кресло на эффективность вождения

Динамика изменения средних значений указывает на то, что в экспериментах без воздействия уровень внимания был выше и больший процент ошибок совершался по невнимательности по сравнению с экспериментами с вибромассажной и мятным маслом. Мятное масло и вибромассажная накидка ухудшали средние времена реакции и повышали количество ошибок в экспериментах. Хотя различия не достигли уровня статистической значимости, можно предположить, что они производили легкий расслабляющий эффект, снижая уровень стрессовой активации, которая препятствовала развитию сонливости у испытуемых.

Суммируя наши исследования и известные результаты в данной области, можно сформулировать следующие требования к системам контроля состояния водителей и других операторов, занятых монотонной деятельностью, при которой может возникнуть эффект декремента бдительности:

- предварительное тестирование состояния водителя: алкотестер, тестирование времени реакции. Время тестирования 5–15 минут. При длительном вождении рекомендуется проводить тестирование каждые 1.5–2 часа;

- контроль признаков отвлечения водителя в реальном времени: поза, направление взгляда, использование мобильного телефона, моргания и закрытие глаз;

- использование нескольких показателей, отражающих различные аспекты состояния испытуемого (например, поза и положение головы, закрытие глаз, кожно-гальваническая реакция, спектральные характеристики вариабельности сердечного ритма);

- определение индивидуальных порогов для измеряемых психофизиологических показателей.

Выводы

Создание в настоящее время «умных автомобилей» с интеллектуальным электронным помощником, берущим на себя рутинные функции, приводит к тому, что внима-

ние водителя снижается, а сонливость за рулем развивается быстрее. Хронический стресс и хроническая депривация сна ухудшают качество вождения и повышают число ошибок (в нашем исследовании – в среднем 2.2 ошибки за 90 минут).

На основании проведенного исследования сформулированы основные критерии для практического внедрения систем контроля состояния водителей и других операторов, занятых монотонной деятельностью:

- мониторинг отвлечения водителя (видеотрекинг позы, положения головы, направления взгляда, морганий и закрытия глаз);

- тестирование перед вождением времени и качества тестов на реакцию, блокировка управления при неудовлетворительных показателях; при длительном вождении – тестирование каждые 1.5–2 часа;

- мониторинг состояния водителя в реальном времени по морганиям, кожно-гальванической реакции или характеристикам сердечного ритма;

- в случае наступления выраженной сонливости водитель должен прервать вождение и принять рекомендованные меры по снижению сонливости: снижение температуры в салоне; чашка кофе; несколько физических упражнений; короткий сон 20–40 минут.

Массажная вибромассажная накидка на кресло или периодическое распыление мятного масла, по нашим данным, не могут быть рекомендованы для улучшения внимания и снижения сонливости у водителей с депривацией сна.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российской академии наук и Российского фонда фундаментальных исследований.

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры нормальной физиологии Медицинского института Российского университета дружбы народов за организацию и помощь в проведении экспериментов.

Литература

1. WHO: Road traffic injuries, 13.12.2023. (<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>).
2. A. Morgan, F.L. Mannering
Accid. Anal. Prev., 2011, **43**(5), 1852.
DOI: 10.1016/j.aap.2011.04.024.
3. J. Weng, Q. Meng
Saf. Sci., 2012, **50**(4), 1034. DOI: 10.1016/j.ssci.2011.12.005.
4. К. Янушкевич
РБК. Тренды. Общество. Исследование: средняя продолжительность сна россиян составила 6.83 часа, 27.08.2021. (trends.rbc.ru/trends/social/6128ba189a79477d3d16f1f7).
5. В.С. Tefft
Sleep, 2018, **41**(10), zsy144. DOI: 10.1093/sleep/zsy144.
6. F.V. Razvadauskas
Euromonitor International. Top Three Automotive and Mobility Trends in 2023.
(<https://www.euromonitor.com/article/top-three-automotive-and-mobility-trends-in-2023>).
7. О.Н. Ткаченко, В.Б. Дорохов, В.В. Дементюченко, Е.О. Гандина, Г.Н. Арсеньев, А.О. Таранов, Д.Р. Бакирова, Д.С. Свешиников
Социально-экологические технологии, 2022, **12**(1), 62.
DOI: 10.31862/2500-2961-2022-12-1-62-80.
8. T. Vogelpohl, M. Kühn, T. Hummel, M. Vollrath
Accid. Anal. Prev., 2018, **126**, 70. DOI: 10.1016/j.aap.2018.03.013.
9. D.M. Raizen, J. Mullington, C. Anaclet, G. Clarke et al.
Sleep, 2023, **46**(9), zsad069. DOI: 10.1093/sleep/zsad069.
10. О.Н. Ткаченко, В.Б. Дорохов, В.В. Дементюченко
Социально-экологические технологии, 2020, **10**(4), 482.
DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-4-482-509
11. A. Telpaz, B. Rhindress, I. Zelman, O. Tsimhoni
B Proc. 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (UK, Nottingham, 1-3 September, 2015), US, NY, New York, Publ. Association for Computing Machinery, 2015, pp. 23–30.
DOI: 10.1145/2799250.2799267.
12. M. Mahachandra, Yassierli, E.D. Garnaby
Procedia Manuf., 2015, **4**, 471. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.11.064.
13. S. Scarpelli, V. Alfonsi, M. Gorgoni, M. Camaioni, A.M. Giannini, L. de Gennaro
Brain Sci., 2021, **11**. DOI:10.3390/brainsci11081090.
14. Нейроком. Решения и продукция. Системы профессионального психофизиологического обследования. Универсальный психодиагностический комплекс УПДК-МК. (<https://neurocom.ru/products/professional-systems/updk-mk/>).
15. I. Stancin, M. Cifrek, A. Jovic
Sensors, 2021, **21**(11), 3786. DOI: 10.3390/s21113786.
16. N.B. Powell, J.K. Chau
Med. Clin. North Am., 2010, **94**(3), 531.
DOI: 10.1016/j.mcna.2010.02.002.
17. J. Vicente, P. Laguna, A. Bartra, R. Bailon
Med. Biol. Eng. Comput., 2016, **54**(6), 927.
DOI: 10.1007/s11517-015-1448-7.
18. Z. Shiner, S. Akselrod, Y. Dagan, A. Baharav
Auton. Neurosci., 2006, **130**(1-2), 17.
DOI: 10.1016/j.autneu.2006.04.006.
19. L.I. Aftanas, S.A. Golosheikine
Neurosci. Lett., 2001, **310**(1), 57.
DOI: 10.1016/s0304-3940(01)02094-8.
20. J.F. Cavanagh, M.J. Frank
Trends Cogn. Sci., 2014, **18**(8), 414. DOI: 10.1016/j.tics.2014.04.012.

English

Psychophysiological Predictors of the Quality of Car Simulator Driving Against the Background of Chronic Sleep Deprivation*

Olga N. Tkachenko

Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, RAS
5A Butlerov Str., Moscow, 117485, Russia
tkachenkoon@gmail.com

Vladimir B. Dorokhov

Professor,
Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, RAS
5A Butlerov Str., Moscow, 117485, Russia
vbdorokhov@mail.ru

Valeriy V. Dementienko

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, RAS
11 Mokhovaya Str., Moscow, 125009, Russia
v.dementienko@neurocom.ru

Eugenia O. Gandina

Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, RAS
5A Butlerov Str., Moscow, 117485, Russia
gandina.e@ihna.ru

Gleb N. Arsenyev

Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, RAS
5A Butlerov Str., Moscow, 117485, Russia
Byron100z@gmail.com

Anton O. Taranov

Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, RAS
5A Butlerov Str., Moscow, 117485, Russia
psy.msu.ru@gmail.com

Alexandra N. Puchkova

Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, RAS
5A Butlerov Str., Moscow, 117485, Russia
puchkovaan@gmail.com

Dmitry S. Sveshnikov

Medical Institute, RUDN University
8 Miklukho-Maklaya Str., Moscow, 117198, Russia
sveshnikov_ds@rudn.university

Abstract

Vigilance decrement during monotonous work was studied using driving simulator. The objectives of the study were to evaluate psychophysiological predictors of vigilance decrement and to test two non-

invasive techniques to reduce sleepiness: vibromassage chair cover and peppermint essential oil against the background of chronic sleep deprivation.

Eighteen healthy subjects with partial sleep deprivation participated in the study. Facial videotape, electroencephalogram (EEG), electrocardiogram (ECG) and cutaneous galvanic response (CGR) were recorded. Subjects were tested for sleepiness, general well-being, and reaction time.

Based on the test results, the subjects were in a state of chronic sleep deprivation and chronic stress. On average, they made 2.2 (0 to 7) errors per experiment. About 20% of the subjects' errors were estimated to be caused by distraction rather than by falling asleep. Conclusions were drawn about the dependence of the level of attention and sleepiness on several factors, and the need for further research. Based on the experimental data, a list of recommendations for the design of driver condition monitoring systems was developed.

Keywords: car drivers, partially automated driving, ECG, EEG, ESR, operator performance, sleepiness, videotracking, vigilance decrement.

**The work was financially supported by RFBR (project 19-29-06071).*

Images & Tables

Table 1. Errors and reaction times to events in experiments

Parameter	Event in the experiment					
	no exposure		massage seat cover		peppermint oil	
	mean	standard deviation	mean	standard deviation	mean	standard deviation
Number of mistakes	1.95	1.10	2.42	2.18	2.55	1.98
Reaction time to redness of the road, s	2.38	0.83	2.65	1.04	3.08	1.36
Stopping distance in front of a pedestrian, m	1.60	0.31	2.21*	1.10	2.30*	1.56

**Statistically significant differences from the first experiment without intervention, $p < 0.01$.*

Table 2. Changes in the heart rate variability index (mean and standard error values)

HRV index measurement time	Type of exposure					
	no exposure		massage seat cover		peppermint oil	
	mean	standard deviation	mean	mean	standard deviation	mean
In the first two minutes of work	3.22	1.94	3.40	2.24	4.20	2.56
Within a minute before the error	12.78*	7.15	13.36*	14.42	11.86*	5.72
During the entire period of work	4.45	2.18	4.84	1.76	4.76	1.65

** Significant differences from the values at the beginning of the experiment ($F(1;70)=52.5, p > 0.0001$).*

Table 3. Changes in the eye closure level index (means and standard deviations)

PERCLOS measurement time	Type of exposure					
	no exposure		massage seat cover		peppermint oil	
	mean	standard deviation	mean	standard deviation	mean	standard deviation
In the first two minutes of work	0.13	0.074	0.11	0.052	0.12	0.06
Within a minute before the error	0.13	0.06	0.12	0.054	0.12	0.05
During the entire period of work	0.49*	0.44*	0.78*	0.38*	0.70*	0.35*

** Significant differences when conducting ANOVA with repeated changes, $F(1;70)=71.36, p < 0.001$.*

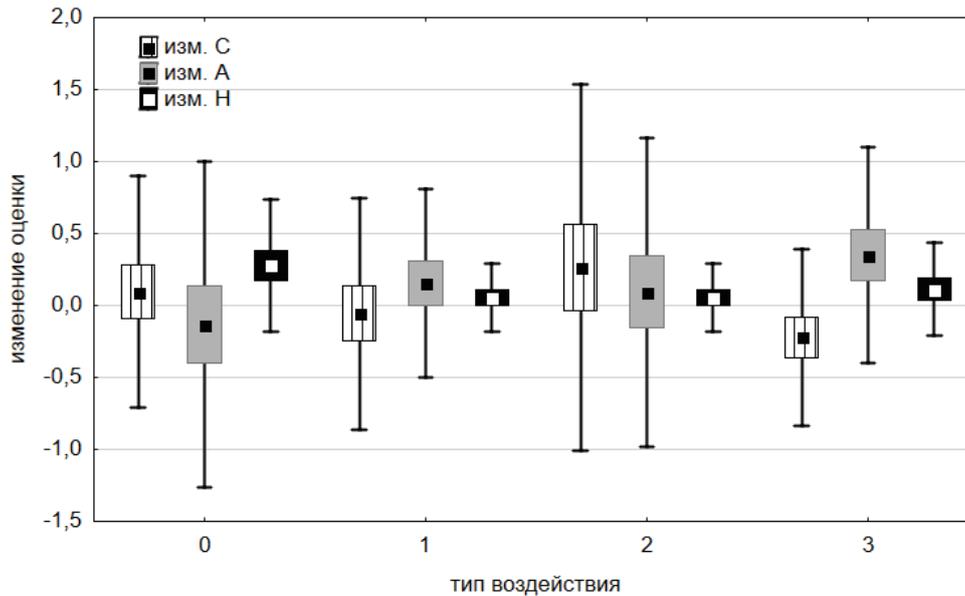


Fig. 1. Difference of Self-esteem (C), Activity (A) and Mood scales of the questionnaire after the experiment and before the experiment. X-axis shows the types of experiment: 0 – training session; 1 – with sleep deprivation; 2 – with sleep deprivation and massage seat cover; 3 – with sleep deprivation and exposure to peppermint oil.

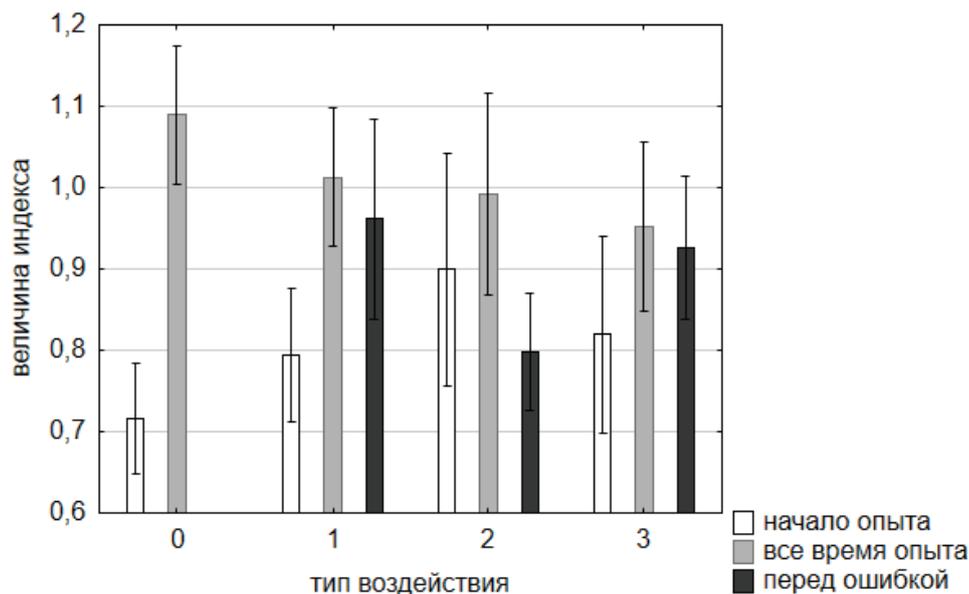


Fig. 2. Mean standard deviations of the alpha/beta ratio index in experiments with different types of exposure: 0 – training session; 1 – without exposure; 2 – massage seat cover; 3 – exposure to peppermint oil.

References

1. WHO: Road traffic injuries, 13.12.2023. (<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>).
2. A. Morgan, F.L. Mannering *Accid. Anal. Prev.*, 2011, 43(5), 1852. DOI: 10.1016/j.aap.2011.04.024.
3. J. Weng, Q. Meng *Saf. Sci.*, 2012, 50(4), 1034. DOI: 10.1016/j.ssci.2011.12.005.
4. K. Yanushkevich *RBC. Trends. Society. Study: the Average Sleep Duration of Russians Was 6.83 Hours [RBK. Trendy. Obshchestvo. Issledovaniye: srednyaya prodolzhitel'nost sna rossiyan sostavila 6.83 chasa]*, 27.08.2021 (in Russian). (trends.rbc.ru/trends/social/6128ba189a79477d3d16f1f7).
5. B.C. Tefft *Sleep*, 2018, 41(10), zsy144. DOI: 10.1093/sleep/zsy144.
6. F.V. Razvadauskas *Euromonitor International. Top Three Automotive and Mobility Trends in 2023*. (<https://www.euromonitor.com/article/top-three-automotive-and-mobility-trends-in-2023>).
7. O.N. Tkachenko, V.B. Dorohov, V.V. Dementienko, E.O. Gandina, G.N. Arsenyev, A.O. Taranov, D.R. Bakirova, D.S. Svishnikov *Environment and Human: Ecological Studies [Socialno-ekologicheskie tekhnologii]*, 2022, 12(1), 62 (in Russian). DOI: 10.31862/2500-2961-2022-12-1-62-80.
8. T. Vogelpohl, M. Kühn, T. Hummel, M. Vollrath *Accid. Anal. Prev.*, 2018, 126, 70. DOI: 10.1016/j.aap.2018.03.013.

9. **D.M. Raizen, J. Mullington, C. Anacleit, G. Clarke et al.** *Sleep*, 2023, **46**(9), zsad069. DOI: 10.1093/sleep/zsad069.
10. **O.N. Tkachenko, V.B. Dorohov, V.V. Dementienko** *Environment and Human: Ecological Studies [Socialno-ekologicheskie tekhnologii]*, 2020, **10**(4), 482 (in Russian). DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-4-482-509
11. **A. Telpaz, B. Rhindress, I. Zelman, O. Tsimhoni** In *Proc. 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (UK, Nottingham, 1-3 September, 2015)*, US, NY, New York, Publ. Association for Computing Machinery, 2015, pp. 23–30. DOI: 10.1145/2799250.2799267.
12. **M. Mahachandra, Yassierli, E.D. Garnaby** *Procedia Manuf.*, 2015, **4**, 471. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.11.064.
13. **S. Scarpelli, V. Alfonsi, M. Gorgoni, M. Camaioni, A.M. Giannini, L. de Gennaro** *Brain Sci.*, 2021, **11**. DOI: 10.3390/brainsci11081090.
14. **Neurocom. Solutions and Products. Systems of Professional Psychophysiological Examination. Universal Psychodiagnostic Complex UPDC-MK [Neyrokom. Resheniya i produktsia. Sistemy professionalnogo psikhofiziologicheskogo obsledovania. Universalny psikhodiagnostichesky kompleks UPDK-MK]** (in Russian). (<https://neurocom.ru/products/professional-systems/updk-mk/>).
15. **I. Stancin, M. Cifrek, A. Jovic** *Sensors*, 2021, **21**(11), 3786. DOI: 10.3390/s21113786.
16. **N.B. Powell, J.K. Chau** *Med. Clin. North Am.*, 2010, **94**(3), 531. DOI: 10.1016/j.mcna.2010.02.002.
17. **J. Vicente, P. Laguna, A. Bartra, R. Bailon** *Med. Biol. Eng. Comput.*, 2016, **54**(6), 927. DOI: 10.1007/s11517-015-1448-7.
18. **Z. Shiner, S. Akselrod, Y. Dagan, A. Baharav** *Auton. Neurosci.*, 2006, **130**(1-2), 17. DOI: 10.1016/j.autneu.2006.04.006.
19. **L.I. Aftanas, S.A. Golocheikine** *Neurosci. Lett.*, 2001, **310**(1), 57. DOI: 10.1016/s0304-3940(01)02094-8.
20. **J.F. Cavanagh, M.J. Frank** *Trends Cogn. Sci.*, 2014, **18**(8), 414. DOI: 10.1016/j.tics.2014.04.012.

О построении интеллектуальной системы управления распределенными радиолокационными средствами для обнаружения объектов малоразмерной авиации в условиях плотной городской застройки*

А.А. Сенцов, М.Б. Сергеев, Е.К. Григорьев

Определены задачи исследования по своевременному обнаружению, распознаванию и классификации воздушных объектов, определению координат и направления движения в режиме реального времени, прогнозированию положения воздушного объекта, а также оптимальному разворачиванию распределенной системы с учетом профиля зданий, сооружений и объектов в контролируемой зоне, а также разработке перспективных модулированных радиосигналов в условиях возрастающего уровня естественных и искусственных помех на основе технологии множественного доступа с применением специальных квазиортогональных базисов. Представлены результаты научного исследования, включающие теоретические обоснования, результаты моделирования и натурных экспериментов по созданию интеллектуальной системы управления распределенными радиолокационными средствами для обнаружения объектов малоразмерной авиации в условиях плотной городской застройки, что является основой для реализации разработанной системы в промышленном варианте.

Ключевые слова: радиолокационная станция, комплексирование информации, интеллектуальная система, квазиортогональные базисы, шумоподобные сигналы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-29-06029).

Введение

В настоящее время объекты малоразмерной авиации (ОМА) являются современным средством для проведения дистанционной фото- и видеосъемки. Несмотря на наличие Постановления Правительства Российской Федерации от 25.05.2019 №658 о необходимости регистрации беспилотных гражданских воздушных судов с максимальной взлетной массой от 0.25 до 30 кг, средства регистрации их перемещения сегодня отсутствуют. Благодаря доступной цене и простоте освоения управления они могут рассматриваться как потенциально опасные объекты, проникающие в воздушное пространство над военными, секретными, социально значимыми объектами инфраструктуры (аэропорты, вокзалы, системы жизнеобеспечения, мосты) и частными владениями. При условии существования методов перехвата управления [1, 2] и способах противодействия им [3], всё большую актуальность принимают исследования, направленные на разработку средства обнаружения и распознавания ОМА, особенно в воздушном пространстве города [4–7].

Очевидно, что решать задачу обнаружения и сопровождения ОМА можно с использованием оптических средств за счет визуального контакта с обнаруженным объектом. Однако они имеют существенные недостатки, а именно:

- узкое поле зрения на больших дальностях;

- отсутствие возможности всепогодного и круглосуточного наблюдения.

Альтернативным средством является радиолокационная станция (РЛС), представляющая собой активное излучающее средство обзора пространства. Следует отметить, что применение различных по физическим принципам работы средств позволяет использовать в совокупности их преимущества и перекрывать недостатки [8, 9]. Тем не менее, основным средством обнаружения ОМА на дальностях, обеспечивающих возможность применения превентивных защитных мер, являются РЛС.

Целью работы являлась проработка основных решений, необходимых при создании системы управления распределенными радиолокационными средствами для обнаружения ОМА в условиях плотной городской застройки.

Для достижения указанной цели необходимо решение задач:



СЕНЦОВ
Антон Александрович
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения



СЕРГЕЕВ
Михаил Борисович
профессор,
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения



ГРИГОРЬЕВ
Евгений Константинович
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

- оптимального развертывания распределенной системы с учетом профиля зданий, сооружений и объектов в контролируемой зоне;
- своевременного обнаружения, распознавания и классификации воздушных объектов;
- определения координат и направления движения (составляющих векторов скорости) в режиме реального времени;
- прогнозирования положения воздушного объекта.

Моделирование радиолокационной обстановки распределенной системы РЛС

Схема формирования и отработки проектно-конструкторских решений радиолокационных средств показывает, что, по завершении расчетно-теоретического этапа, включающего параметрический синтез и анализ проектно-конструкторских решений, требуется практическое подтверждение технических вариантов исполнения, напрямую связанное с имитационным и полунатурным моделированием, стендовой отработкой и натурными испытаниями [10].

Применяемые процедуры опираются на методы математической статистики и регрессионного анализа, численные ме-

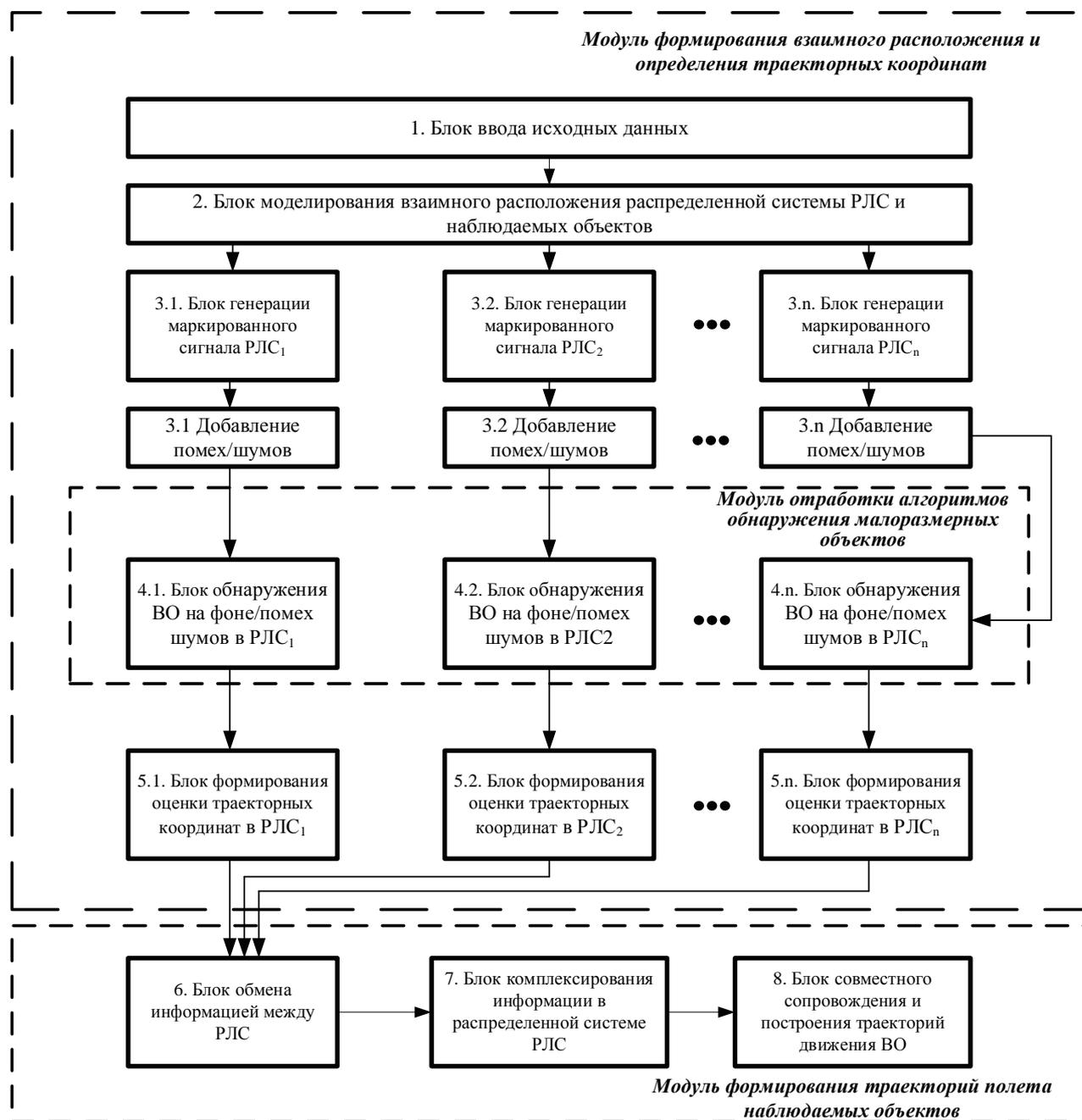


Рис. 1. Структурная схема программы для проведения имитационного моделирования.

тоды параметрической оптимизации, в основе которых лежат следующие допущения:

- возможность сравнения реакций модели и объекта;
- однородность и независимость проводимых опытов;
- математическая корректность задачи параметрической оптимизации;
- аналитическое задание границ допустимой области параметров.

В рамках проведенных исследований была разработана программа – имитатор радиолокационной обстановки интеллектуальной системы управления распределенной системы РЛС с модульной архитектурой. Структурная схема имитатора приведена на *рис. 1*.

Модель в случае режима «земля–воздух» для двухпозиционной системы автономных РЛС включает в себя множество объектов, а именно: переотражения от подстилающей поверхности, от воздушного объекта (ВО) естественного или искусственного происхождения, от статических объектов в зоне наблюдения и т. д. Кроме того, каждый объект имеет свои особенности и характеристики. Например, для ВО это вектор скорости и ускорения, ЭПР и др. [11].

Первый этап моделирования предполагает ввод исходных данных в соответствии с данными расчетно-теоретического этапа и результатами ранее проведенных натурных и полунатурных испытаний, поскольку возможность отдельно задавать параметры, например, каждой из РЛС, приближает их к реально существующим образцам.

В программе используются способы и алгоритмы обработки сигналов, разработанные для современных пространственно-распределенных систем воздушного мониторинга в режиме «земля–воздух», в блоках которой учитываются как сложные маршруты движения ВО, их отражающие свойства, так и положение и форма диаграмм направленности антенн автономных РЛС, влияние метеословий и т. п.

Моделирование работы каждого программного блока в отдельности с учетом функциональных особенностей и полученных на практике статистических данных позволяет качественно отладить разработанные алгоритмы и получить достоверные результаты моделирования, что, в свою очередь, обеспечивает качественную отладку применяемых алгоритмов комплексирования.

Программа, реализующая имитационную модель, позволяет обеспечивать завязку траекторий и принятие решения о дальнейшем сопровождении ВО распределенными РЛС. Отработка различных сценариев ускоряет развертывание системы за счет сокращения этапа полунатурных и натурных испытаний.

К реальным условиям функционирования модель приближают сформированные базы данных характеристик беспилотных летательных систем самолетного, вертолетного и мультикоптерного типов [11].

Кроме перечисленных возможностей, при проектировании и эксплуатации РЛС предусматривается учет влияния осадков и растительности при распространении радиоволн, а также явлений, связанных с эффектом замираний при рас-

пространении радиоволн, имеющих место в плотной городской застройке. В модели учитываются:

- дифракционное замирание в результате блокирования трассы наземными объектами;
- многолучевое распространение вследствие отражения от поверхностей;
- уменьшение избирательности по кроссполяризации (XPD) при многолучевости;
- искажение сигнала, обусловленное частотно-избирательными замираниями и запаздываниями [10–13].

Распознавание воздушных объектов и интеллектуализация системы

Несмотря на очевидное превосходство РЛС над оптическими системами наблюдения, для них существует проблема распознавания принадлежности принятого сигнала. Так, на экране оператора РЛС отметка от малоразмерного ВО сопоставима с отметкой от птицы и представляет собой «яркостное пятно». Применение аппаратно-программных средств выделения микроплеровского эффекта в принятом радиолокационном сигнале позволяет определять по спектральному портрету обнаруженного ВО его принадлежность к естественному или искусственному типу.

На *рис. 2* представлены полученные с помощью РЛС спектральные портреты объектов искусственного происхождения и птиц. Анализ портретов показывает, что у техногенных объектов в спектральном портрете присутствуют боковые составляющие, причем их количество и амплитуда не являются постоянными величинами [14].

Однако обученная на большом наборе спектральных портретов нейронная сеть дает возможность автоматического распознавания обнаруживаемых ВО в системе РЛС.

Для создания интеллектуальной системы управления распределенными РЛС для обнаружения ОМА в условиях плотной городской застройки требуется обработка данных в ре-

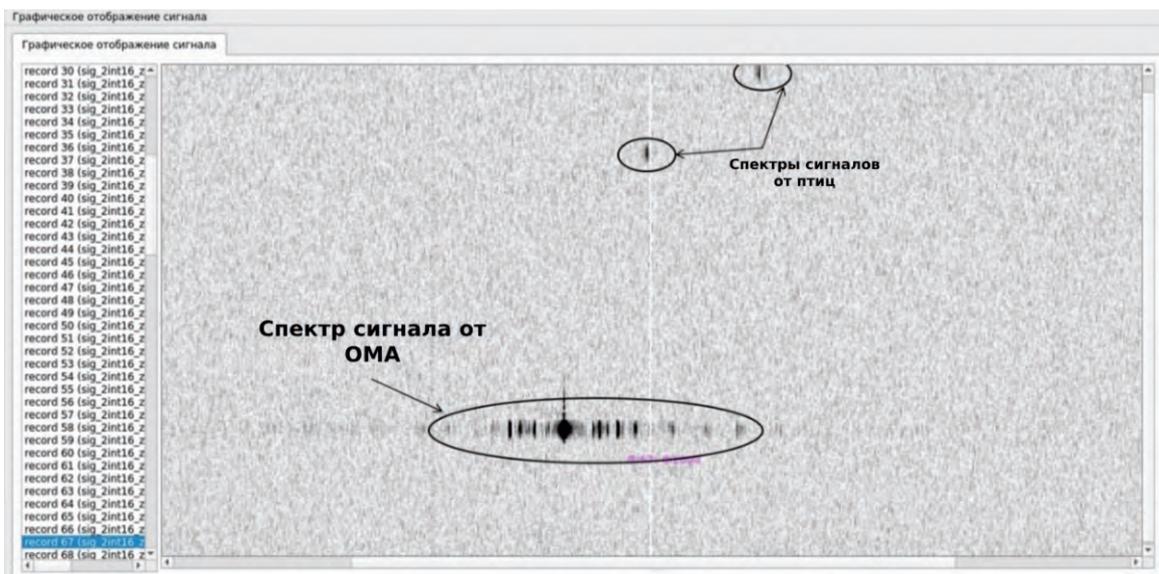


Рис. 2. Спектральные портреты воздушных объектов [14].

жиге, близком к реальному времени. В распределенной системе удаление между РЛС может достигать значительных расстояний, включающих препятствия в условиях плотной городской застройки. Это требует разработки защищенного беспроводного канала передачи данных. Для связи разнесенных в пространстве РЛС целесообразно использование совокупности ортогональных сигналов с хорошими корреляционными характеристиками, для обеспечения как требуемой степени влияния друг на друга, так и высокого показателя разрешения на фоне помех [15, 16].

При разработке системы исследованы методы построения персимметричных квазиортогональных матриц и кодовые последовательности на основе строк указанных матриц [17–19]. Исследование показало, что решение отойти от классического подхода, когда алфавит кодовой последовательности является целочисленным и симметричным, позволяет улучшить корреляционные свойства последних.

В качестве примера на рис. 3 показаны аperiodическая и периодическая автокорреляционные функции (АКФ) предложенных кодовых последовательностей. Первая получена из строки квазиортогональной матрицы с элементами $\{1, -b\}$, вторая – из t -последовательности. Длина каждой последовательности $N=15$.

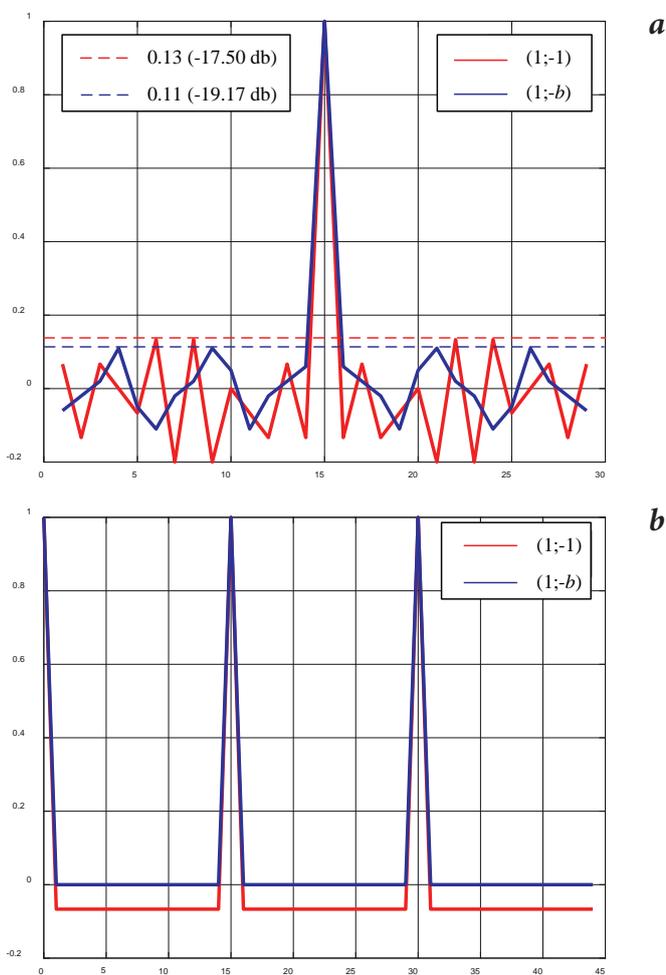


Рис. 3. Сравнение корреляционных характеристик известных и предлагаемых кодовых последовательностей: а – аperiodическая АКФ; б – периодическая АКФ.

Выигрыш в максимальном уровне бокового лепестка аperiodической АКФ в рассмотренном примере составляет 1.67 дБ. Предлагаемые последовательности обладают одноуровневой периодической АКФ, что при применении в качестве преамбул кадров в потоке данных обеспечивает их

лучшее выделение в условиях сложной электромагнитной обстановки города.

Выбор технологии для реализации РЛС распределенной системы направлен на минимизацию факторов, связанных с физическими принципами функционирования: искажения диаграммы направленности многоэлементной активной фазированной антенной решетки (АФАР) из-за температурных изменений; искажения диаграммы направленности плоской многоэлементной АФАР из-за взаимного влияния излучателей [20–23].

Одним из вариантов реализации РЛС распределенной системы являются экспериментальные образцы, построенные по технологии каскадируемых активных фазированных волноводно-щелевых антенных решеток [24].

Основные результаты проектирования распределенной системы РЛС

Проведенные в процессе проектирования исследования позволили проработать основные решения, необходимые при создании распределенной системы мобильных РЛС для обнаружения ОМА в условиях плотной городской застройки, а также решить ряд технических задач.

В частности, определены способы размещения в зоне плотной городской застройки мобильных РЛС на основе каскадируемых антенных секций с перестраиваемыми параметрами под особенности, связанные с размещением.

Разработаны методы формирования зондирующих сигналов РЛС и сигналов цифровых коммуникационных каналов, обеспечивающие их маркирование и возможность выделения в условиях действия естественных и искусственных помех.

Разработаны методы совмещения результатов обработки информации от разнородных источников в едином информационном формате для принятия решения интеллектуальной системой управления распределенными РЛС.

Разработан гибридный классификатор, обеспечивающий принятие решения о принадлежности обнаруживаемого объекта к одному из классов ВО – естественному или искусственному.

Предложены решения для обеспечения безопасности информационного обмена между постами РЛС и наземным пунктом управления за счет маскирования, сжатия и кодирования радиолокационных данных.

На основе накопленных статистических данных с помощью имитатора малоразмерной воздушной цели на базе ОМА разработаны и внедрены специализированные алгоритмы обработки радиолокационных данных:

- совмещения радиолокационных изображений с цифровой картой местности;
- выделения и учета микродплеровского эффекта в принятом радиолокационном сигнале;
- гибридной классификации, включающей предварительную обработку (фильтрацию, выделение классификационных признаков, кластеризацию, аппроксимацию) и при-

нятие решения о принадлежности обнаруживаемого воздушного объекта к одному из классов;

- выделения и учета спектральных характеристик принятого радиолокационного сигнала на основе нейронной сети.

Заключение

Проведенные исследования относятся к перспективному направлению развития систем радиолокации, связанному с переходом к пространственно-распределенным их реализациям, в том числе на основе мобильных РЛС.

В отличие от традиционного подхода проработаны вопросы построения распределенных станций с опорой на технологии множественного доступа с применением специальных квазиортогональных базисов. Их применение позволит обеспечить высокие тактические характеристики РЛС: структурную скрытность, помехозащищенность, высокую разрешающую способность, обеспечиваемые совокупностью ортогональных сигналов с хорошими корреляционными свойствами.

В области синтеза, обработки и кодирования сигналов определились следующие противоречия. Во-первых, возрастающие требования к гарантированной передаче модулированных радиосигналов в условиях возрастающих уровней естественных и искусственных помех при неизменных подходах к формированию классических кодов. Во-вторых, обеспечение в радиоканале помехоустойчивого кодирования сигналов за счет ослабления требований к автокорреляционной функции с одновременным переходом к новому несимметричному представлению кодов.

В этой связи для проектируемой системы распределенных РЛС решена задача выбора конкретных типов сложных зондирующих сигналов при использовании нескольких разнесенных передающих и приемных антенн, объединенных в высокоскоростную сеть обработки и комплексирования информации.

Литература

1. **M. Hooper, Y. Tian, R. Zhou, B. Cao, A. Lauf, L. Watkins, W. Robinson, W. Alexis**
В Proc. 2016 IEEE Military Communications Conference (USA, Baltimore, 01–03 November, 2016), USA, Baltimore, 2016, pp. 1213–1218.
DOI: 10.1109/MILCOM.2016.7795496.
2. **Э.А. Аджуханов, О.В. Николаев**
Вестник концерна ВКО «Алмаз-Антей», 2021, 2(37), 35.
DOI: 10.38013/2542-0542-2021-2-35-41.
3. **С.И. Макаренко**
Противодействие беспилотным летательным аппаратам, РФ, Санкт-Петербург, Научное издание, 2020, 204 с.
4. **J. Pyrgies**
J. Airline & Airport Manag., 2019, 9(2), 63. DOI: 10.3926/jairm.127.
5. **S. Park, H. Kim, S. Lee, H. Joo, H. Kim**
IEEE Access, 2021, 9, 42635. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3065926.
6. **С.И. Макаренко, А.В. Тимошенко, А.С. Васильченко**
Системы управления, связи и безопасности, 2020, №1, 109.
DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105.
7. **E. Martins, E. Faith, K. Chethan, O. Ozgur, G. Ismail**
В Proc. 2019 IEEE Aerospace Conference, (USA, Big Sky, 02–09 March, 2019), USA, Big Sky, 2019, pp. 1–13.
DOI: 10.1109/AERO.2019.8741970.
8. **C. Huang, I. Petrunin, A. Tsourdos**
В Proc. 2023 IEEE 10th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), (Italy, Milan, 19–21 June, 2023), Italy, Milan, 2023, pp. 395–400.
DOI: 10.1109/MetroAeroSpace57412.2023.10189934.
9. **G. Danopal, C. Mayr, A. Kariminezhad, D. Vriesmann, A. Zimmer**
В Proc. 2022 Sensor Data Fusion: Trends, Solutions, Applications (SDF), (Germany, Bonn, 12–14 October, 2022), Germany, Bonn, 2022, pp. 1–6.
DOI: 10.1109/SDF55338.2022.9931946.
10. **А.А. Турчак, А.Н. Шестун, А.А. Сенцов**
Формализация и оптимизация жизненного цикла создания бортовых радиоэлектронных комплексов, под ред. Ю.М. Смирнова, РФ, Санкт-Петербург, ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021, 294 с.
11. **М.Б. Сергеев, А.А. Сенцов, Е.К. Григорьев, С.А. Ненашев**
Моделирование, оптимизация и информационные технологии, 2020, 8(3), 1.
DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.038.
12. **А.А. Сенцов, В.Б. Поляков, Г.П. Иванов**
В Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах, под ред. Е.Д. Соложенцева, В.В. Карасева, РФ, Санкт-Петербург, ГУАП, 2020, с. 109–114.
13. **J. Wang, Y. Shi, C. Yang, S. Ji, H. Su**
Radio Sci., 2020, 55(10), 1. DOI: 10.1029/2019RS007048.
14. **И.И. Петров, В.П. Шкодырев, А.А. Сенцов, С.А. Иванов**
Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт, 2022, 16(3), 4.
DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-3-4-10.
15. **Радиолокационные системы авиационно-комического мониторинга земной поверхности и воздушного пространства**, под ред. В.С. Вербы, Б.Г. Татарского, РФ, Москва, Радиотехника, 2014, 576 с.
16. **Novel Radar Techniques and Applications. Vol 1: Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar**, Ed. R. Klemm, UK, London, Scitech Publishing, 2017, 952 pp.
17. **Е.К. Григорьев, В.А. Ненашев, А.М. Сергеев, Е.В. Самохина**
Телекоммуникации, 2020, №10, 27.
18. **В.А. Ненашев, А.М. Сергеев, Е.А. Капранова**
Информационно-управляющие системы, 2020, 4(95), 9.
DOI: 10.31799/1684-8853-2018-4-9-14.
19. **А.М. Сергеев**
Телекоммуникации, 2022, №9, 28.
DOI: 10.31044/1684-2588-2022-0-9-28-33.
20. **В.И. Тепликова, А.А. Сенцов, В.А. Ненашев, В.Б. Поляков**
Труды МАИ, 2022, №125, 1.
DOI: 10.34759/trd-2022-125-17.
21. **В.И. Лапшин, Г.В. Зеленикина, И.В. Трусилова**
Антенны, 2021, №5(273), 65.
DOI: 10.18127/j03209601-202105-07.
22. **И.В. Чернова, А.С. Тодошева**
Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт, 2018, 12(8), 27.
DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10128.
23. **А.М. Голиков, Н.И. Воронцов**
В Сб. Тез. докл. Всерос. научн. конф. «Шарыгинские чтения» (РФ, Томск, 29 сентября – 01 октября, 2021), РФ, Томск, Изд. ТУСУР, 2021, с. 167–173.
24. **I.V. Tokarevsky, A.A. Sentsov, M.B. Sergeev**
В Proc. XXIV International conference «Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems» (WECONF-2022), (RF, Saint-Petersburg, 30 May – 03 June, 2022), RF, Saint Petersburg, 2022, pp. 1–4.
DOI: 10.1109/WECONF55058.2022.9803393.

English

On the Construction of an Intelligent Control System for Distributed Radar Facilities for Detecting Objects of Small-Sized Aviation in Dense Urban Areas*

Anton A. Sentsov

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67 let. A Bolshaya Morskaya Str., Saint Petersburg, 190000, Russia
toxx@list.ru

Mikhail B. Sergeev

Professor,
Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67 let. A Bolshaya Morskaya Str., Saint Petersburg, 190000, Russia
mbse@mail.ru

Evgeniy K. Grigoriev

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67 let. A Bolshaya Morskaya Str., Saint Petersburg, 190000, Russia
grig.evkg@gmail.com

Abstract

The tasks of research on timely detection, recognition and classification of aerial objects, determination of coordinates and direction of movement in real time, prediction of the position of an aerial object, as well as optimal deployment of a distributed system taking into account the profile of buildings, structures and objects in the controlled area, as well as the development of promising modulated radio signals in conditions of increasing levels of natural and artificial interference are determined based on multiple access technology using special quasi-orthogonal bases. The results of the scientific study are presented, including theoretical justifications, results of modeling and field experiments on the creation of an intelligent control system for distributed radar facilities for detecting objects of small-sized aviation in dense urban areas, which is the basis for the implementation of the developed system in an industrial version.

Keywords: radar, data fusion, intelligent system, quasi-orthogonal basis, noise-like signals.

*The work was financially supported by RFBR (project 19-29-06029).

Images & Tables

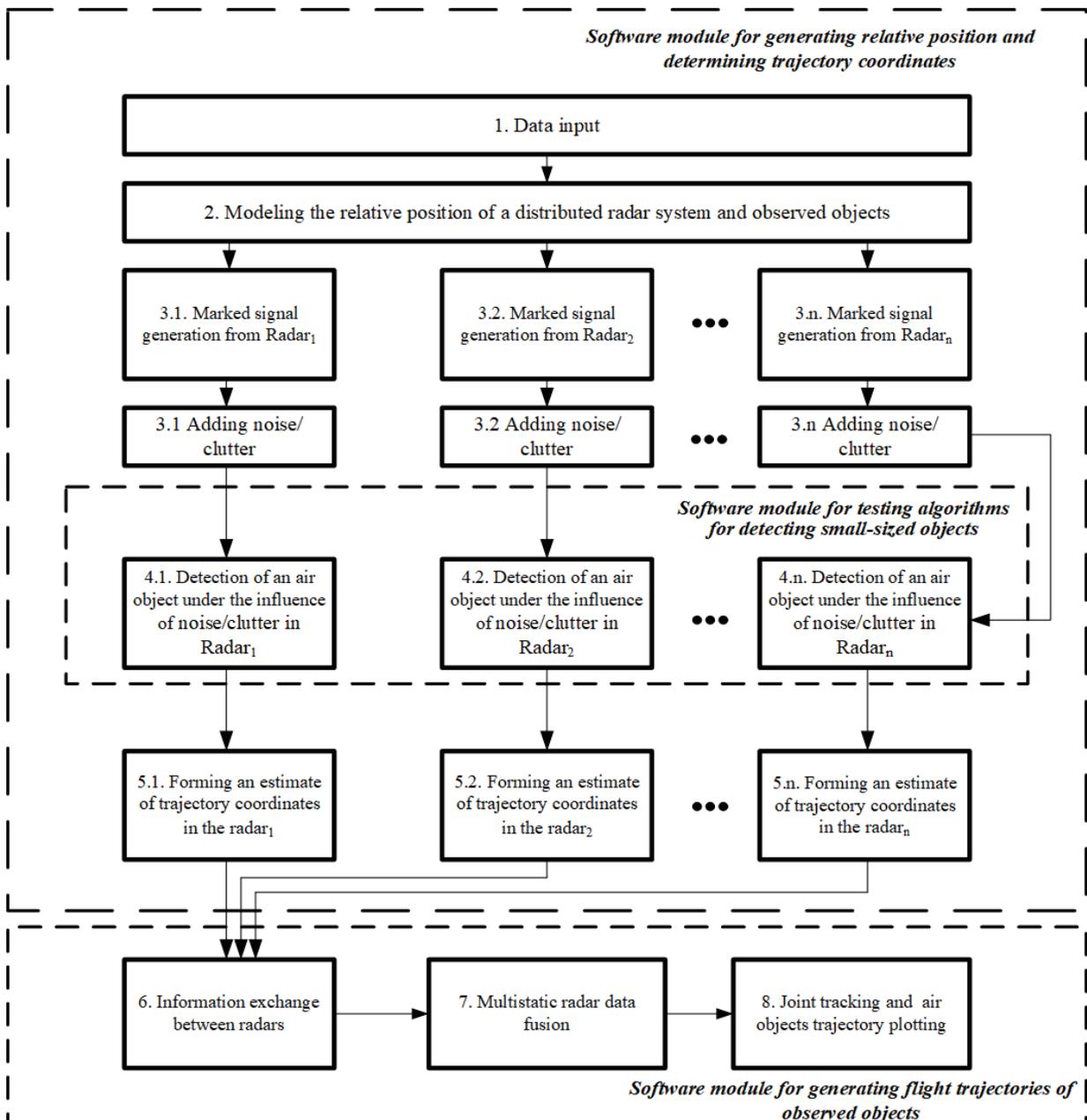


Fig. 1. Simulation modeling program block diagram.

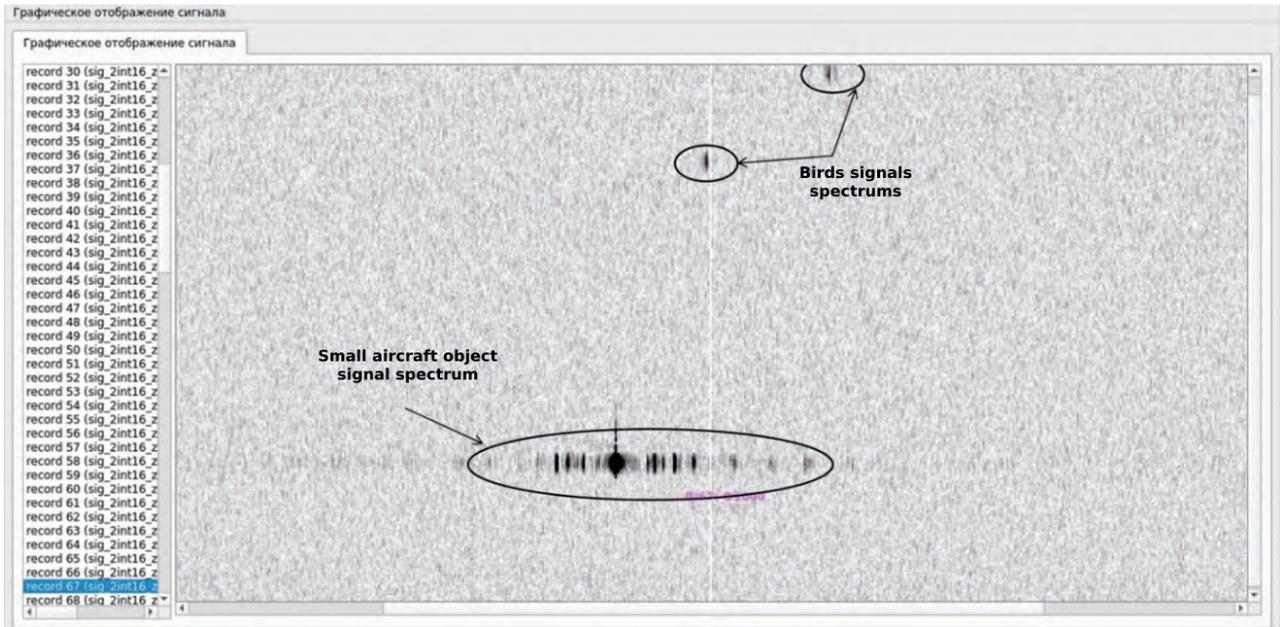


Fig. 2. Spectrum portraits of air objects [14].

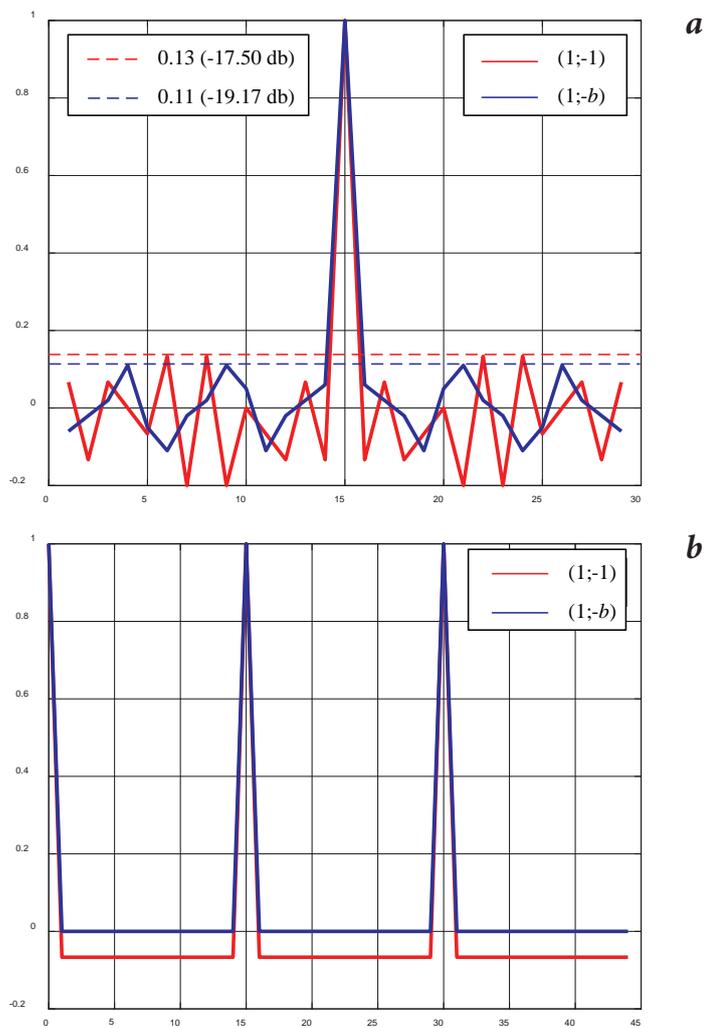


Fig. 3. Comparison of correlation characteristics of well-known and proposed code sequences: a – aperiodic autocorrelation function; b – periodic autocorrelation function.

References

1. **M. Hooper, Y. Tian, R. Zhou, B. Cao, A. Lauf, L. Watkins, W. Robinson, W. Alexis**
In *Proc. 2016 IEEE Military Communications Conference (USA, Baltimore, 01–03 November, 2016)*, USA, Baltimore, 2016, pp. 1213–1218. DOI: 10.1109/MILCOM.2016.7795496.
2. **E.A. Adzhakhunov, O.V. Nikolaev**
J. “Almaz-Antey” Air and Space Defence Corporation [Vestnik kontserna VKO “Almaz-Antey”], 2021, 2(37), 35 (in Russian). DOI: 10.38013/2542-0542-2021-2-35-41.
3. **S.I. Makarenko**
Countering Unmanned Aerial Vehicles [Protivodestvie bespilotnym letatelnykh apparatam], RF, Saint Petersburg, Naukoemkie tekhnologii, 2020, 204 pp. (in Russian).
4. **J. Pyrgies**
J. Airline & Airport Manag., 2019, 9(2), 63. DOI: 10.3926/jairm.127.
5. **S. Park, H. Kim, S. Lee, H. Joo, H. Kim**
IEEE Access, 2021, 9, 42635. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3065926.
6. **S.I. Makarenko, A.V. Timoshenko, A.S. Vasilchenko**
Systems of Control, Communication and Security [Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti], 2020, №1, 109 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105.
7. **E. Martins, E. Faith, K. Chethan, O. Ozgur, G. Ismail**
In *Proc. 2019 IEEE Aerospace Conference, (USA, Big Sky, 02–09 March, 2019)*, USA, Big Sky, 2019, pp. 1–13. DOI: 10.1109/AERO.2019.8741970.
8. **C. Huang, I. Petrunin, A. Tsourdos**
In *Proc. 2023 IEEE 10th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), (Italy, Milan, 19–21 June, 2023)*, Italy, Milan, 2023, pp. 395–400. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace57412.2023.10189934.
9. **G. Danapal, C. Mayr, A. Kariminezhad, D. Vriesmann, A. Zimmer**
In *Proc. 2023 IEEE 10th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), (Italy, Milan, 19–21 June, 2023)*, Italy, Milan, 2023, pp. 395–400. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace57412.2023.10189934.
10. **A.A. Turchak, A.N. Shestun, A.A. Sentsov**
Formalization and Optimization of the Life Cycle of Creating On-Board Radio-Electronic Systems [Formalizatsia i optimizatsia zhiznennogo tsikla sozdaniya bortovykh radioelektronnykh kompleksov], Ed. U.M. Smirnov, RF, Saint Petersburg, POLYTECH-PRESS, 2021, 294 pp. (in Russian).
11. **M.B. Sergeev, A.A. Sentsov, E.K. Grigoriev, S.A. Nenashev**
Modeling, Optimization and Information Technology [Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii], 2020, 8(3), 1 (in Russian). DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.038.
12. **A.A. Sentsov, V.B. Polyakov, G.R. Ivanova**
In *Modeling and Analysis of Security and Risk in Complex Systems [Modelirovanie i Analiz Bezopasnosti i Riska v Slozhnykh Sistemakh]*, Eds E.D. Solozhencheva and V.V. Karasev, RF, Saint Petersburg, SUAI, 2020, pp. 109–114 (in Russian).
13. **J. Wang, Y. Shi, C. Yang, S. Ji, H. Su**
Radio Sci., 2020, 55(10), 1. DOI: 10.1029/2019RS007048.
14. **I.I. Petrov, V.P. Shkodyrev, A.A. Sentsov, S.A. Ivanov**
T-Comm, 2022, 16(3), 4 (in Russian). DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-3-4-10.
15. **Radar Systems for Aerospace Monitoring of the Earth’s Surface and Airspace [Radiolokatsionnye sistemy aviatsionno-kosmicheskogo monitoringa zemnoy poverkhnosti i vozdušnogo prostranstva]**, Eds V.S. Verba and B.G. Tatarsky, RF, Moscow, Radiotekhnika, 2014, 576 pp. (in Russian).
16. **Novel Radar Techniques and Applications. Vol 1: Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar**, Ed. R. Klemm, UK, London, Scitech Publishing, 2017, 952 pp.
17. **E.K. Grigoriev, V.A. Nenashev, A.M. Sergeev, E.V. Samohina**
Telecommunications [Telekommunikatsii], 2020, №10, 27 (in Russian).
18. **V.A. Nenashev, A.M. Sergeev, E.A. Kapranova**
Information and Control Systems [Informatsionno-upravliaiustchie sistemy], 2020, 4(95), 9 (in Russian). DOI: 10.31799/1684-8853-2018-4-9-14.
19. **A.M. Sergeev**
Telecommunications [Telekommunikatsii], 2022, 9, 28 (in Russian). DOI: 10.31044/1684-2588-2022-0-9-28-33.
20. **V.I. Teplikova, A.A. Sentsov, V.A. Nenashev, V.B. Polyakov**
Trudy MAI, 2022, №125, 1 (in Russian). DOI: 10.34759/trd-2022-125-17.
21. **V.I. Lapshin, G.V. Zelepukina, I.V. Trusilova**
J. Antennas [Antenny], 2021, №5(273), 65 (in Russian). DOI: 10.18127/j03209601-202105-07.
22. **I.V. Chernova, A.S. Todosheva**
T-Comm, 2018, 12(8), 27 (in Russian). DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10128.
23. **A.M. Golikov, N.I. Voroncov**
In *Proc. All-Russian Conf. «Sharygin Readings» [Tezisy dokl. Vseros. konf. «Sharyginskie chteniya»]* (RF, Tomsk, 29 September – 01 October, 2021), RF, Tomsk, TUSUR University Publ., 2021, pp. 167 (in Russian).
24. **I.V. Tokarevsky, A.A. Sentsov, M.B. Sergeev**
In *Proc. XXIV International conference «Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems» (WECONF-2022)*, (RF, Saint-Petersburg, 30 May – 03 June, 2022), RF, Saint Petersburg, 2022, pp. 1–4. DOI: 10.1109/WECONF55058.2022.9803393.

Имитационное моделирование и оценка эффективности систем обнаружения и противодействия беспилотным транспортным средствам, несущим угрозу нормальному функционированию «умного города»*

Н.В. Быков, М.С. Товарнов, В.А. Федулов

Предложена система компьютерных моделей для оценки эффективности систем обнаружения и противодействия беспилотным транспортным средствам в условиях «умного города». Рассматриваемыми беспилотными транспортными средствами являются беспилотные автомобили и беспилотные летательные аппараты. Разработана упрощенная модель гетерогенного автомобильного потока, состоящего из беспилотных и управляемых человеком автомобилей. Модель позволяет исследовать процесс перехвата беспилотного автомобиля, управление которым было захвачено. В рамках исследования процессов противодействия беспилотным летательным аппаратам создана имитационная модель системы обнаружения и противодействия налету группы беспилотных летательных аппаратов, а также впервые в трехмерной постановке решена задача перехвата группы беспилотных летательных аппаратов другой группой (роем) беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: «умный город», беспилотные летательные аппараты, противодействие, безопасность, эффективность, методы синтеза, глубокое обучение.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-29-06090).

Введение

Беспилотные транспортные средства (БТС) в настоящее время получили широкое распространение как в гражданской, так и в военной сфере. Наиболее интенсивно развивающимися БТС являются беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и беспилотные автомобильные транспортные средства (БАТС).

Можно смело утверждать, что в ближайшем будущем БТС продолжат распространяться, улучшаясь как по производительности, так и по функциональности. Создавать всё более компактные и дешевые беспилотные транспортные платформы позволяет прогресс в области разработки источников питания, миниатюризации электроники и авионики, материалов и методологии проектирования. Всё это расширяет возможности приме-

нения БТС в различных областях, но вместе с этим увеличивает риск их использования в преступных и террористических целях, в частности, в условиях города. В этих случаях обнаружение, идентификация и обезвреживание таких БТС, перемещающихся вблизи ключевых объектов инфраструктуры, становятся критически важными. Задача защиты от БТС является сложной проблемой, поскольку речь идет не только об устранении БТС с целью помешать ему выполнить свою миссию, но и о немедленном обнаружении и идентификации БТС, его контролируемой и предсказуемой нейтрализации для обеспечения безопасности объектов инфраструктуры и людей, находящихся поблизости, и минимизации сопутствующего ущерба.

Опишем кратко основные особенности рассматриваемых в работе типов БТС: БАТС и БПЛА.

БАТС интенсивно внедряются в транспортные потоки по всему миру: Waymo (Google), Aptiv, Baidu, General Motors Cruise, Яндекс и другие компании ведут активную работу по разработке и тестированию таких систем [1]. В Российской Федерации решается вопрос их правового регулирования [2], а в мире обсуждается безопасность и этическая сторона их применения [3]. Помимо индивидуального удобства пассажира (отсутствие необходимости управлять транспорт-



БЫКОВ
Никита Валерьевич
Российский университет транспорта (РУТ-МИИТ),
Московский государственный
технический университет
им. Н.Э. Баумана
(национальный исследова-
тельский университет)



ТОВАРНОВ
Михаил Степанович
Московский
государственный
технический университет
им. Н.Э. Баумана
(национальный
исследовательский
университет)



ФЕДУЛОВ
Вадим Алексеевич
Московский государственный
технический университет
им. Н.Э. Баумана
(национальный
исследовательский
университет)

ным средством), у БАТС отсутствуют недостатки, присущие водителю-человеку, которые заключаются в большом времени реакции и наличии «человеческого фактора». БАТС могут обмениваться информацией либо непосредственно друг с другом (интерфейс V2V – vehicle to vehicle), либо через дорожно-информационную инфраструктуру (интерфейс V2I – vehicle to infrastructure) [4]. Всё это позволяет БАТС двигаться друг за другом с минимальным интервалом, образуя специальные формации, которые можно назвать кластерами (англ. platoon), – это объединенная колонна беспилотных автомобилей, движущаяся с общей скоростью. Перечисленные особенности позволяют избежать основного фактора, который является источником затрудненного движения, – так называемых stop-and-go волн, образующихся из-за того, что, например, на светофоре каждый последующий автомобиль стартует с некоторой задержкой относительно движущегося впереди [5–7].

БПЛА имеют большие перспективы в части их применения в условиях «умного города». Малоразмерные БПЛА коптерного типа относительно дешевы, технологичны, создают мало шума и т. д. В работе речь пойдет о малоразмерных БПЛА, которые имеют габариты до 2 м, массу до 10 кг и способны поднимать груз массой до 1 кг, в качестве которого может выступать, к примеру, аппарата видеонаблюдения. Такие БПЛА применяются в различных сферах человеческой деятельности: как часть «интернета вещей» (англ. Internet of Things – IoT) «умного города» [8, 9]; для доставки товаров и услуг [10]; для мониторинга городского трафика, состояния окружающей среды, инфраструктуры и т. д. [11]; как часть правоохранительной и/или охранной систем [12] и т. д. В то же время БПЛА могут применяться для контрабанды, промышленного шпионажа и других незаконных действий [13, 14]. В настоящее время ведутся работы по объединению БПЛА в организованные группы [15–17] для более эффективного выполнения ими задач, что несет в себе дополнительные потенциальные угрозы. Как следствие, остро встает проблема эффективного противодействия малоразмерным БПЛА [12, 18], для решения которой необходима разработка средств и методов противодействия БПЛА.

Создание групп БПЛА может быть использовано и для разработки средств защиты. Так, решение задачи отражения налета группы малоразмерных БПЛА может быть осуществлено путем их перехвата роем автономных БПЛА-перехватчиков, координированно выполняющих задачу. Роевые системы позволяют повысить эффективность выполнения задач и в гражданской сфере применения БПЛА: проведения аэрофотосъемки, видеосъемки, мониторинга природных ресурсов и окружающей среды, охраны границ и проведения поисково-спасательных работ. Существующие подходы к управлению роем БПЛА [19, 20] показывают хорошие результаты в задачах, где четко определено оптимальное поведение роя в целом. Однако для задачи перехвата БПЛА формализованы только цели и частично критерии эффективного выполнения.

Для решения сложных задач управления БПЛА всё чаще используются методы машинного обучения и элементы искусственного интеллекта: для слежения за целью, коммуникации, настройки логики управления, определения структуры роя или ускорения расчета оптимальных траекторий.

Статья организована следующим образом. В первой части рассмотрены вопросы построения компьютерной модели автомобильных гетерогенных транспортных потоков, состоящих из традиционных (управляемых человеком) и беспилотных автомобилей, а также моделирование процесса перехвата БАТС, управление которым было захвачено. Во второй части описана имитационная модель системы обнаружения и противодействия налету группы БПЛА. И, наконец, в третьей части продемонстрированы результаты решения задачи перехвата группы БПЛА роем БПЛА-перехватчиков; эта задача впервые решена в трехмерной постановке.

Модель транспортной системы «умного города»

Построена компьютерная модель, позволяющая осуществлять симуляцию гетерогенного транспортного потока из автомобильных транспортных средств (АТС), управляемых человеком, и БАТС. Широко используемым в подобных случаях является подход клеточных автоматов [21–23]. Используется наиболее простая модель – модификация правила 184 для элементарного клеточного автомата. Текущее положение (номер ячейки) i -го АТС изменяется во времени по закону:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + H[P(g_i(t)) - U[0,1]],$$

где $H[y]$ – функция Хевисайда; $P=P(g_i(t))$ – вероятность ускорения; $g_i(t)$ – расстояние (число свободных клеток) до впереди едущего транспортного средства; $U[0,1]$ – равномерно распределенное от 0 до 1 слу-

чайное число. Функция $P(g_i(t))$ является возрастающей [24]. Модель позволяет учитывать эффекты случайного торможения и медленного старта.

В модели движения БАТС отсутствует фактор случайного торможения, то есть аргумент функции Хевисайда имеет вид $y=g_i(t)$. Режим кластеризации БАТС работает по следующему правилу: если имеется непрерывный набор последовательно расположенных клеток длиной не более $S+1$, занятых БАТС, впереди которого имеется свободная клетка, то при переходе с шага по времени t на шаг $t+1$ все эти БАТС смещаются на одну клетку как единое целое. Здесь S – максимальное число БАТС, которые могут следовать за лидером; $S+1$ – длина кластера.

Описанная система АТС представляет собой, по сути, набор частиц, движущийся по простым правилам. Методы исследования таких систем основаны на статистической физике. Для имитации бесконечной системы задаются периодические граничные условия. После этого симуляция запускается с произвольными начальными условиями. После релаксации системы к равновесному состоянию по прошествии T шагов по времени проводятся измерения макропараметров в течение T_c шагов по времени.

На рис. 1 показаны зависимости плотности потока АТС (это число АТС, проходящих в единицу

времени через некоторую клетку) от их плотности (число АТС, приходящееся на одну клетку) при различных долях БАТС в системе для двух вариантов: отсутствия и наличия кластеризации. Видно, что внедрение БАТС способно существенно увеличить пропускную способность дорог, а кластеризация способствует еще большему ее повышению.

Рассмотрим ситуацию захвата управления одного из БАТС. В этом случае нужно перехватить и вывести из строя указанный БАТС (далее – цель, Ц-агент) с тем, чтобы обеспечить безопасность транспортной системы. Предположим, что это наиболее эффективно сделать мощным направленным электромагнитным воздействием, которое, в силу больших массогабаритных характеристик, может быть осуществлено доставкой соответствующего средства воздействия на другом БАТС. Таким образом, в системе появляется агент-перехватчик (П-агент), задача которого состоит в том, чтобы догнать Ц-агента. При моделировании П-агент внедряется в равновесную систему и является возмущением. Для простоты Ц-агент движется по тем же правилам, что и остальные БАТС.

П-агент должен двигаться со скоростью большей, чем основной поток. Анализ показывает, что достаточно незначительного превышения. На первой стадии задача П-агента состоит в сокращении расстояния до Ц-агента. Когда П-агент оказывается в непосредственной близости от Ц-агента, активизируется алгоритм перехвата, в результате которого П-агент должен оказаться на соседней клетке с Ц-агентом.

На рис. 2 показаны зависимости эффективности перехвата (число шагов, необходимое для выполнения задачи) от плотности АТС при различных долях БАТС в системе. Для наглядности в случае неуспешного перехвата число шагов принято равным нулю.

Помимо снижения эффективности перехвата при приближении к очень плотному потоку, графики демонстрируют наличие двух трендов, связанных с БАТС: снижение эффективности перехвата в случае, если все АТС являются БАТС, а также отрицательному влиянию на эф-

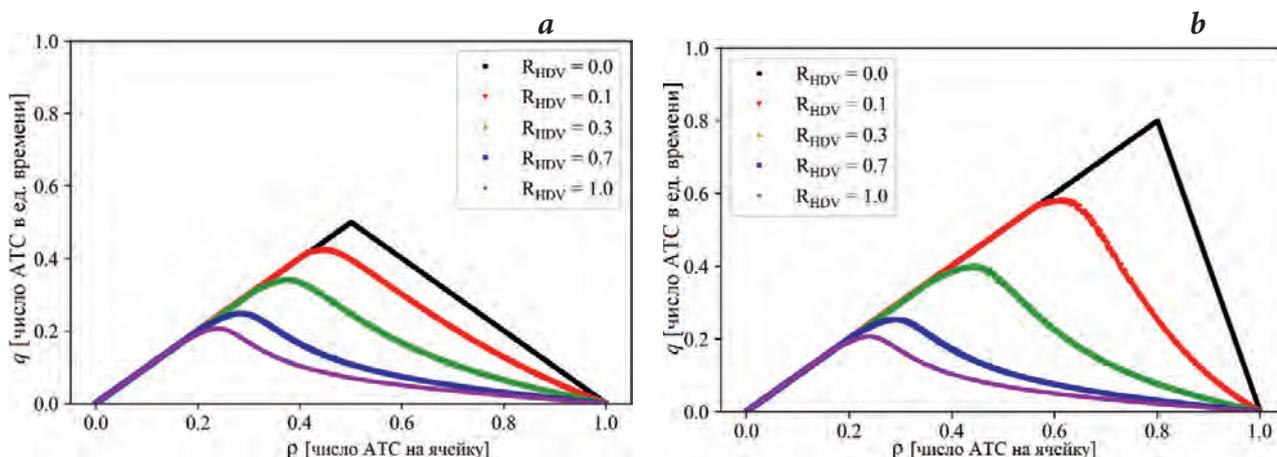


Рис. 1. Фундаментальные диаграммы (зависимости плотности потока от плотности АТС) при различных долях управляемых человеком АТС (R_{HDV}) в случаях: а – отсутствия кластеризации ($S=0$); б – наличия кластеризации ($S=3$).

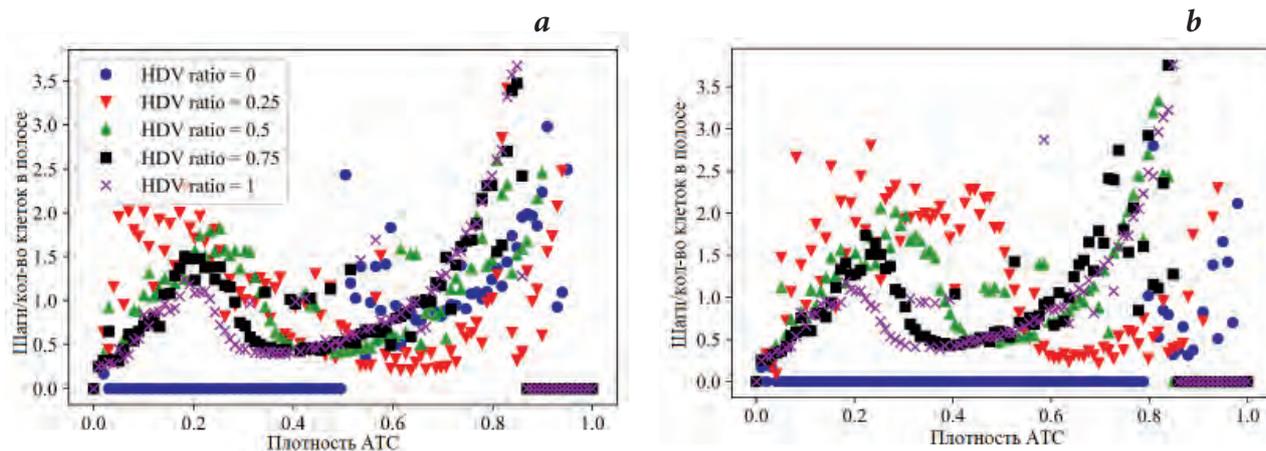


Рис. 2. Зависимость количества шагов, необходимых для перехвата, от плотности автомобилей при различных долях управляемых человеком АТС в случаях: а – отсутствия кластеризации ($S=0$); б – наличия кластеризации ($S=3$).

фективность перехвата способности БАТС образовывать кластеры.

Модель системы обнаружения и нейтрализации БПЛА

Система противодействия БПЛА состоит из двух подсистем: подсистемы обнаружения и подсистемы поражения целей. Подсистема обнаружения представлена радиолокационной станцией (РЛС) с одной или несколькими радарными антеннами, расположенными в пространстве заданным образом. В составе РЛС имеется обнаружитель, отвечающий за установление факта обнаружения цели по принятому антеннами радиолокационному сигналу. Подсистема поражения включает в свой состав одно или несколько средств противодействия (СП). В качестве СП могут рассматриваться огнестрельные, электромагнитные, лазерные и другие средства. Подсистема поражения имеет распределитель целей между СП, который работает по заданному пользователем алгоритму, например, выбирая ближайшее к цели СП.

Разработанная имитационная модель (ИМ), основанная на подходах дискретно-событийного и агентно-ориентированного моделирования, реализована на языке программирования Python 3 с использованием библиотеки SimPy.

Одной из особенностей ИМ является возможность учета запретных зон – зон, в которых размещается некоторый важный объект, например, объект критической инфраструктуры. Количество БПЛА, достигших запретных зон или упавших в них, может служить показателем эффективности системы противодействия: чем меньшее число БПЛА достигнет защищаемых зон, тем более эффективна система противодействия. На рис. 3 представлены результаты, которые получены при моделировании системы противодействия, состоящей из трех радарных антенн и четырех СП с различными средствами воздействия, при различном числе одновременно налетающих БПЛА N_d (3 и 21 аппарат). БПЛА летели слева направо – в зону б ($x \approx -1500$ м, $z \in [-2\ 000; 2\ 000]$ м).

В ИМ накапливается разнообразная статистика, позволяющая оценивать следующие основные показатели [25]: расход средств воздействия N_a (рис. 4), время выполнения задачи T системой противодействия и вероятность поражения всех целей P_{hit} (рис. 5), а также динамику процесса противодействия (рис. 6). Из представленных на рис. 4 и рис. 5 графиков следует, что с увеличением N_d увеличиваются N_a и T . Также увеличивается количество БПЛА, падающих в запретные зоны (см. рис. 3 и рис. 5), то есть увеличивается вероятность нанесения ущерба охраняемым объектам. По распределениям на рис. 6 можно судить о том, за какую часть времени T выводится из строя, падает на землю и/или в запретные зоны заданная часть БПЛА, что, теоретически, может оказаться полезным при оценке требуемого уровня защищенности охраняемых объектов.

ИМ позволяет моделировать БПЛА различных форм и размеров, отдельные подсистемы обнаружения и противодействия (для сравнения эффективности различных их вариантов), учитывать возможность вывода из строя элементов системы противодействия, учитывать ландшафт и различные препятствия, ограничивающие видимость и т. д. (более подробно см. [26]). ИМ можно использовать для решения различных оптимизационных задач, например, задач

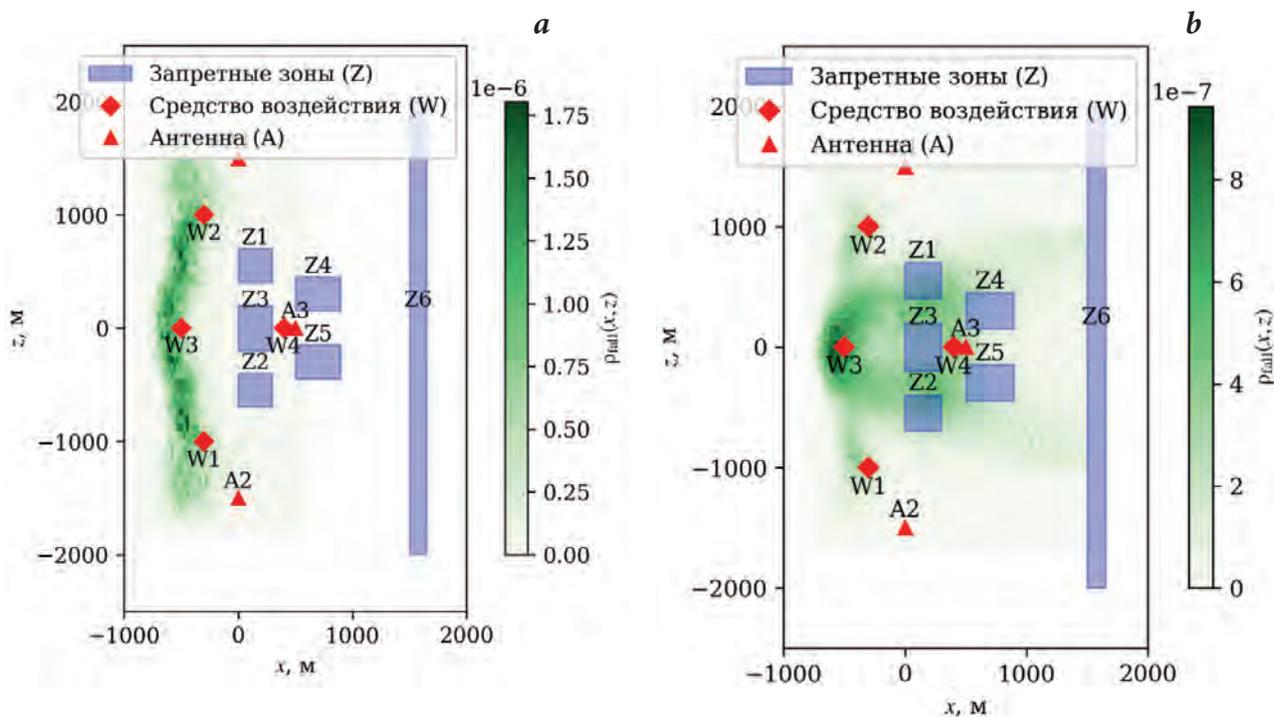


Рис. 3. Плотность распределения точек падения $\rho_{\text{пад}}$ БПЛА в горизонтальной плоскости: а - случай $N_d=3$; б - случай $N_d=21$.

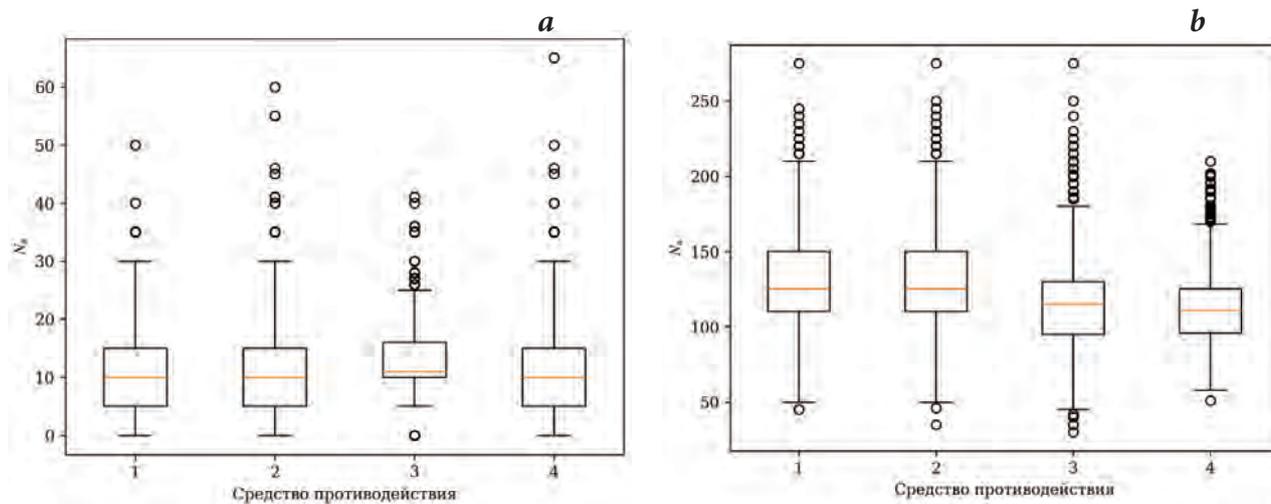


Рис. 4. Расход средств воздействия N_a : а - случай $N_d=3$; б - случай $N_d=21$.

структурного синтеза наиболее эффективных систем противодействия БПЛА.

Перспективным направлением исследования систем противодействия БПЛА является изучение их эффективности в условиях налета организованных групп БПЛА, когда БПЛА в составе группы имеют возможность обмениваться друг с другом различной информацией, на ее основе координируя свои действия, изменяя поведение и/или свои цели для достижения цели группы.

Методы машинного обучения для решения задач управления БПЛА

Одной из проблем, с которыми сталкиваются современные средства противовоздушной обороны при решении задачи отражения налета группы малоразмерных БПЛА, является то, что зачастую стоимость сбитого БПЛА на несколько порядков ниже стоимости средства поражения. В случае большой группы БПЛА может не хватить как каналов наведения, так и запаса средств поражения. Другой тенденцией является уменьшение высот полета и заметности БПЛА и, как следствие, уменьшение дальности обнаружения. Альтернативным методом защиты в этом случае может являться использование роя автономных БПЛА-перехватчиков.

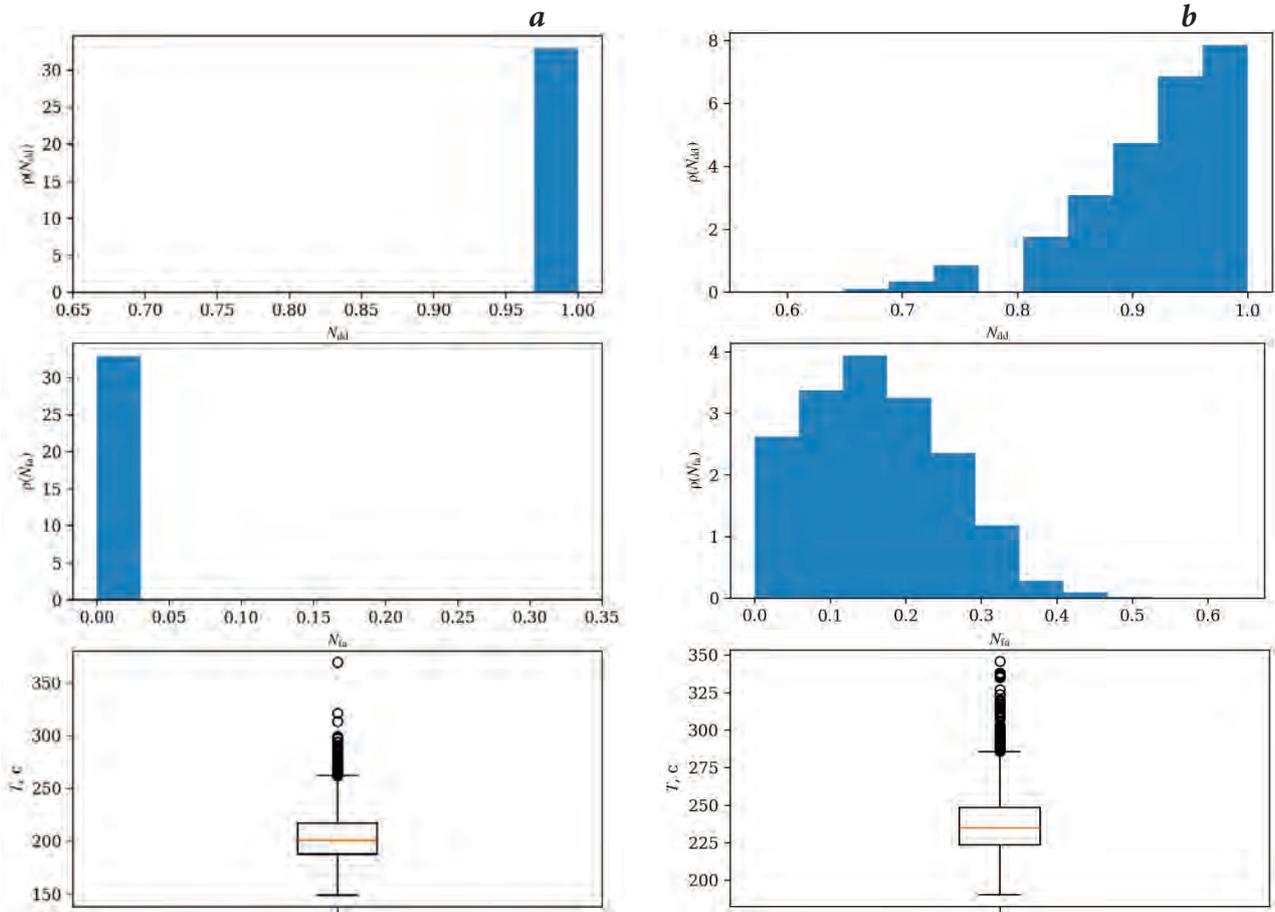


Рис. 5. Распределения p количества пораженных БПЛА N_{dd} и БПЛА, упавших в зоны, N_{fa} и время выполнения задачи системой противодействия T для случаев: а – случай $N_d=3$; б – случай $N_d=21$. В данном случае на осях отмечены величины N_{dd} и N_{fa} относительно количества одновременно летающих БПЛА N_d .

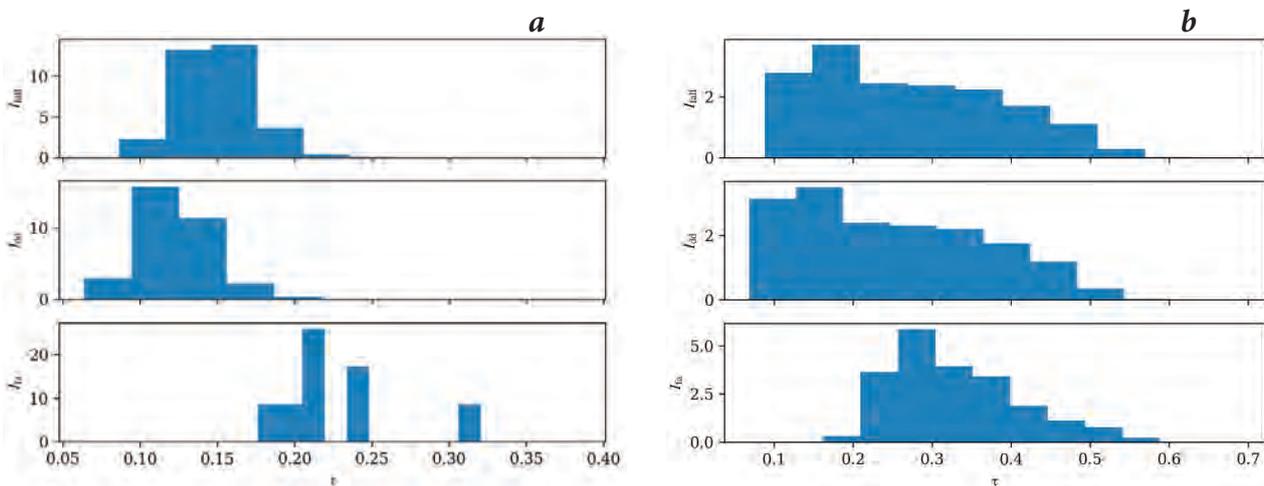


Рис. 6. Распределения интенсивности падения БПЛА I_{fa} , поражения БПЛА I_{dd} и их падения в запретные зоны I_{fa} для случаев в зависимости от относительного времени моделирования $\tau = T/\max(T)$: а – случай $N_d=3$; б – случай $N_d=21$.

Особое место при решении задачи управления БПЛА с использованием машинного обучения занимает машинное обучение с подкреплением (англ. reinforcement learning – RL): оно помогает решать задачи навигации и непосредственного управления БПЛА. RL обладает некоторой универсальностью: агент представляет собой нейронную сеть, наблюдения и действия – векторы действительных чисел,

а награда – скаляр. Основная цель любого алгоритма RL состоит в том, чтобы позволить агенту быстро изучить оптимальное поведение, которое приводит к наивысшему значению вознаграждения. Несмотря на существующие успехи, RL имеет

особенности, усложняющие его применение в реальных задачах: высокая вычислительная сложность и необходимость тщательного выбора функции награды. Поэтому практически невозможно вести обучение на реальном объекте (БПЛА) и обучение ведется в виртуальной среде.

Созданная в работе виртуальная среда, с одной стороны, обладает приемлемой вычислительной сложностью, с другой – теоретически позволит перенести результаты обучения для управления реальными БПЛА. В ней интеллектуальный агент управляет БПЛА не непосредственно, а через существующую систему управления. Агент формирует для системы управления заданную трехмерную траекторию, а система стабилизации отвечает за выработку команд для органов управления, обеспечивающих следование БПЛА по такой траектории. Траектории представляются в виде полинома – кривой Безье, как и в имитационной модели системы противодействия БПЛА.

Моделировался сценарий перехвата группы налетающих БПЛА роем БПЛА-перехватчиков. Количество налетающих БПЛА – 3 шт., перехватчиков – 5 шт. Налетающие БПЛА летят по заранее рассчитанным траекториям и не меняют их на протяжении моделирования. Перехватчиками индивидуально управляет интеллектуальный агент, который в определенные моменты задает новую траекторию в виде кривой Безье. При построении траектории агенту известны: свой текущий вектор скорости, относительные положения и скорости всех налетающих БПЛА, относительные положения, скорости и текущие полетные задания ближайших БПЛА-перехватчиков. Все БПЛА, участвующие в моделировании, имеют одинаковые характеристики, свойственные FPV (англ. First Person View) БПЛА коптерного типа с размером пропеллера 6 дюймов, скоростью до 140 км/ч, располагаемой перегрузкой около 11g. Проведено обучение агента-нейросети, способного асинхронно и независимо стро-

ить допустимые траектории индивидуально для каждого БПЛА в рое, целью которого является перехват группы налетающих БПЛА. На рис. 7 показан прогресс обучения агента: рост доли перехваченных БПЛА в процессе обучения.

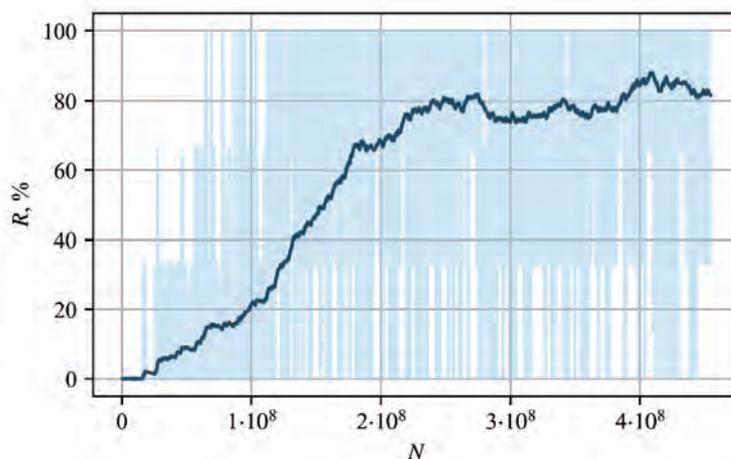


Рис. 7. Прогресс обучения интеллектуального агента, управляющего БПЛА-перехватчиками в рое: R – количество успешно перехваченных БПЛА, N – шаги алгоритма обучения.

Таким образом, при помощи методов глубокого машинного обучения с подкреплением [27, 28] было проведено обучение интеллектуального агента, способного асинхронно и независимо строить допустимые траектории индивидуально для каждого БПЛА как в рое, так и в случае одиночного применения [29]. Весь процесс обучения проведен с использованием фреймворка для обучения с подкреплением с открытым исходным кодом – Stable-Baselines3 [30]. Алгоритм обучения, показавший лучший результат, – TQC [28].

Выводы

Разработан комплекс компьютерных моделей и методов обнаружения и противодействия беспилотным транспортным средствам, несущим угрозу нормальному функционированию «умного города».

В рамках исследования средств противодействия в наземных транспортных системах разработана упрощенная модель гетерогенного транспортного потока. Основным достоинством модели является простота. Это же можно считать и недостатком: как и многие классические модели, она корректно описывает только две основные фазы транспортного потока – свободный поток и плотный поток, в то время как фаза синхронизированного движения этой моделью не описывается. На модели продемонстрирована эффективность внедрения БТС с точки зрения повышения пропускной способности дорог. Показано, что в случае необходимости перехвата одного БТС другим БТС (перехватчиком), наличие большой доли БТС в потоке и эффекта кластеризации являются вредными факторами. Одним из возможных решений для повышения эффективности перехвата является создание протоколов взаимодействия между БТС-перехватчиком и рядовыми БТС.

Для оценки эффективности систем противодействия групповому налету БПЛА разработана универсальная имитационная модель, подходящая и для решения обратных (оптимизационных) задач. С использованием разработанной модели можно решить задачу структурного синтеза системы противодействия, заключающуюся в выборе элементов системы из заданного множества и их размещения в пространстве оптимальным образом для достижения системы наибольшей эффективности по заданному показателю.

Задача перехвата группы налетающих БПЛА роем БПЛА-перехватчиков была решена впервые в трехмерной постановке. Показано, что разработанная виртуальная среда подходит

для использования в современных алгоритмах обучения с подкреплением. Предложенный подход к формированию роевого управления БПЛА может быть применен в более сложных постановках, учитывающих ограничения бортовой аппаратуры БПЛА, зашумленность и неполноту информации о положении других БПЛА и препятствий, что позволит использовать полученные функции управления на реальных БПЛА.

Литература

1. S. Agrawal, A.M. Schuster, N. Britt, E.A. Mack, M.L. Tidwell, S.R. Cotten
Technol. Soc., 2023, **72**, 102186.
DOI: 10.1016/j.techsoc.2022.102186.
2. I. Begishev, D. Bersei, O. Amvrosova, K. Dolgoplov, R. Zhirov
B Proc. Transp. Res. Procedia (RF, Novosibirsk, 02–05 March, 2022), RF, Novosibirsk, 2022, **63**, pp. 648–655.
DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.058.
3. E. Papadimitriou, H. Farah, G. van de Kaa, F. S. de Sio, M. Hagenzieker, P. van Gelder
Accid. Anal. Prev., 2022, **174**, 106724.
DOI: 10.1016/j.aap.2022.106724.
4. R.I. Meneguette, R.E. De Grande, A.A.F. Loureiro
Intelligent Transport System in Smart Cities, FRG, Cham, Springer, 2018, 191 pp.
DOI: 10.1007/978-3-319-93332-0.
5. B.S. Kerner
The Physics of Traffic, FRG, Berlin, Heidelberg, Springer, 2004, 682 pp. DOI: 10.1007/978-3-540-40986-1.
6. M. Treiber, A. Kesting
Traffic Flow Dynamics, FRG, Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, 503 pp.
DOI: 10.1007/978-3-642-32460-4.
7. Введение в математическое моделирование транспортных потоков, под ред. А.В. Гасникова, РФ, Москва, Изд. МЦНМО, 2013, 429 с.
8. K. Al-Dosari, Z. Humaiti, W. Balachandran
Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023, **7**(3), 210.
DOI: 10.3390/drones7030210.
9. S.H. Alsamhi, O. Ma, M.S. Ansari, F.A. Almalki
IEEE Access, 2019, **7**, 128125.
DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2934998.
10. H. Chen, Z. Hu, S. Solak
Eur. J. Oper. Res., 2021, **294**(3), 118.
DOI: 10.1016/j.ejor.2021.02.039.
11. I. Bisio, C. Garibotto, H. Haleem, F. Lavagetto, A. Sciarone
IEEE Access, 2022, **10**, 101537.
DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3207282.
12. S. Park, H.T. Kim, S. Lee, H. Joo, H. Kim
IEEE Access, 2021, **9**, 42635. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3065926.
13. J.P. Yaacoub, H. Noura, O. Salman, A. Chehab
IoT, 2020, **11**, 100218. DOI: 10.1016/j.iot.2020.100218.
14. М.А. Демьянович
Правопорядок: история, теория, практика, 2019, №2(21), 108.
15. В.К. Абросимов
Коллективы интеллектуальных летательных аппаратов: монография, РФ, Москва, Издательский Дом «Наука», 2017, 304 с.
16. J. Johnson
Artificial Intelligence and the Future of Warfare: The USA, China, and Strategic Stability, UK, Manchester University Press, 2021, 230 pp. DOI: 10.7765/9781526145062.00015.
17. J.J. Roldan, P. Garcia-Aunon, E. Peña-Tapia, A. Barrientos
B 2019 International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2022) (Japan, Kyoto, 11–15 March, 2019), 2019, pp. 862–867.
DOI: 10.1109/PERCOMW.2019.8730677.
18. D. He, G. Yang, H. Li, S. Chan, Y. Cheng, N. Guizani
IEEE Network, 2021, **35**(1), 380.
DOI: 10.1109/MNET.011.2000380.
19. K.K. Oh, M.C. Park, H.S. Ahn
Automatica, 2015, **53**, 424.
DOI: 10.1016/j.automatica.2014.10.022.
20. A.A. Bandala, R.R.P. Vicerra, E.P. Dadios
B Proc. TENCON 2014 – 2014 IEEE Region 10 Conference, (Thailand, Bangkok, 22–25 October, 2014), Thailand, Bangkok, IEEE, 2014, pp. 1–6. DOI: 10.1109/TENCON.2014.7022455.
21. K. Nagel, M. Schreckenberg
J. Phys. I France, 1992, **2**(12), 2221. DOI: 10.1051/jp1:1992277.
22. A. Dupuis, B. Chopard
Networks Spat. Econ., 2003, **3**(1), 9.
DOI: 10.1023/A:1022044932736.
23. S. Sakai, K. Nishinari, S. Iida
J. Phys. A. Math. Gen, 2006, **39**(50), 15327.
DOI: 10.1088/0305-4470/39/50/002.
24. N.V. Bykov
Comput. Res. Model, 2022, **14**(5), 1041.
DOI: 10.20537/2076-7633-2022-14-5-1041-1058.
25. А.Н. Лебединец
Организация и боевые возможности мотострелковых подразделений малого масштаба, РФ, Москва, Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 108 с.
26. В.А. Федулов, Н.В. Быков, В.Д. Баскаков
Системы управления, связи и безопасности, 2023, №4, 63.
DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-63-104.
27. A.T. Azar, A. Koubaa, N. Ali Mohamed, H.A. Ibrahim, Z.F. Ibrahim, M. Kazim, A. Ammar, B. Benjdira, A.M. Khamis, I.A. Hameed, G. Casalino
Electronics, 2021, **10**(9), 999. DOI: 10.3390/electronics10090999.
28. A. Kuznetsov, P. Shvechikov, A. Grishin, D. Vetrov
B Proc. 37th International Conference on Machine Learning (Virtual, 13–18 July, 2020), Online, PMLR 119, 2020, pp. 5556–5566.
(<https://proceedings.mlr.press/v119/kuznetsov20a/kuznetsov20a.pdf>).
29. M.S. Tovarnov, N.V. Bykov
B Proc. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 2308 (CMMASS 2021), (RF, Alushta, 04–13 September 2021), RF, Alushta, IOP Publishing, 2022, 012004.
DOI: 10.1088/1742-6596/2308/1/012004.
30. A. Raffin, A. Hill, A. Gleave, A. Kanervisto, M. Ernestus, N. Dormann
J. Mach. Learn. Res., 2021, **22**(268), pp. 1–8.
(<https://jmlr.org/papers/volume22/20-1364/20-1364.pdf>).

English

Computer Simulation and System Efficiency Evaluation for Systems of Detecting and Countering of Unmanned Vehicles that Pose a Threat to a Smart City Transportation System*

Nikita V. Bykov

Russian University of Transport (MIIT),
Bauman Moscow State Technical University
5 2nd Baumanskaya Str., Moscow, 105005, Russia
bykov@bmstu.ru

Vadim A. Fedulov

Bauman Moscow State Technical University
5 2nd Baumanskaya Str., Moscow, 105005, Russia
vadimfedulov.bmstu@gmail.com

Mikhail S. Tovarnov

Bauman Moscow State Technical University
5 2nd Baumanskaya Str., Moscow, 105005, Russia
tovarnov@bmstu.ru

Abstract

In this paper we propose a group of computer models to evaluate the system efficiency for detecting and countering unmanned vehicles in a smart city. The unmanned vehicles mean autonomous vehicles and unmanned aerial vehicles. We developed a simplified model of a heterogeneous traffic flow consisting of unmanned and human-controlled vehicles. The model allows one to study the process of intercepting an autonomous vehicle control of which has been intercepted. We created a simulation model of a system for detecting and countering the attack of a group of unmanned aerial vehicles as part of the study of the processes of countering unmanned aerial vehicles. Also, we solved the problem of intercepting a group of unmanned aerial vehicles by another group (swarm) of unmanned aerial vehicles for the first time in a three-dimensional setting.

Keywords: smart city, unmanned aerial vehicles, countermeasures, safety, efficiency, synthesis methods, deep learning.

*The work was financially supported by RFBR (project 19-29-06090).

Images & Tables

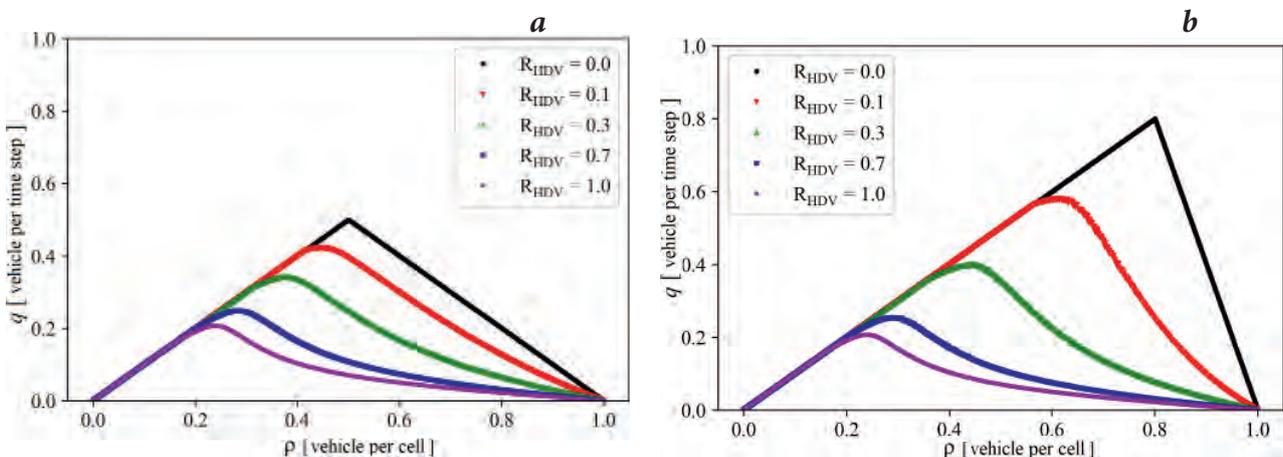


Fig. 1. Fundamental diagrams (flux vs vehicle density) for different ratio of human-driven vehicles (R_{HDV}): a – no platoons ($S=0$); b – platoons available ($S=3$).

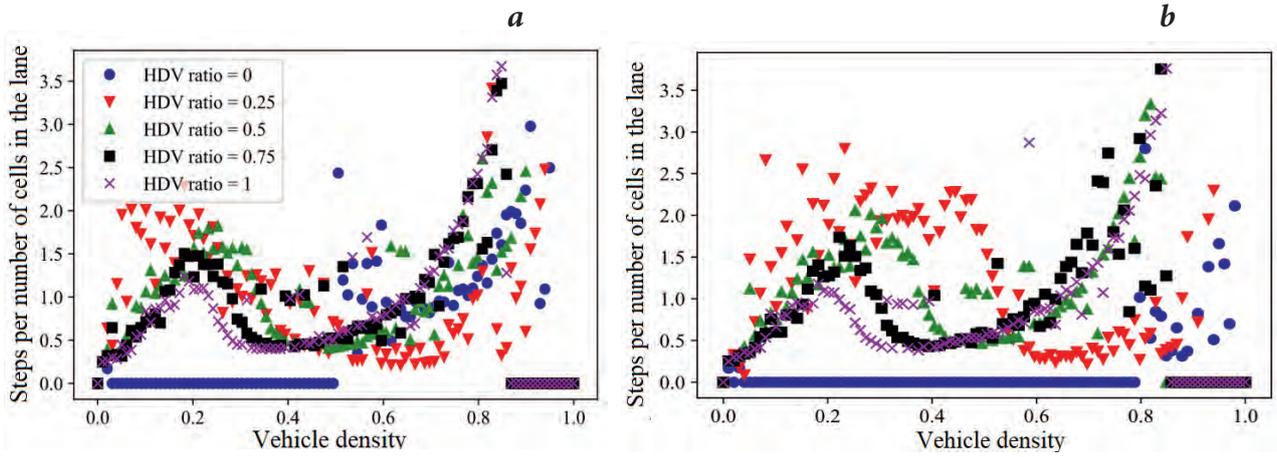


Fig. 2. The number of steps required for interception vs vehicle density for different ratio of human-driven vehicles: no platoons ($S=0$); b – platoons available ($S=3$).

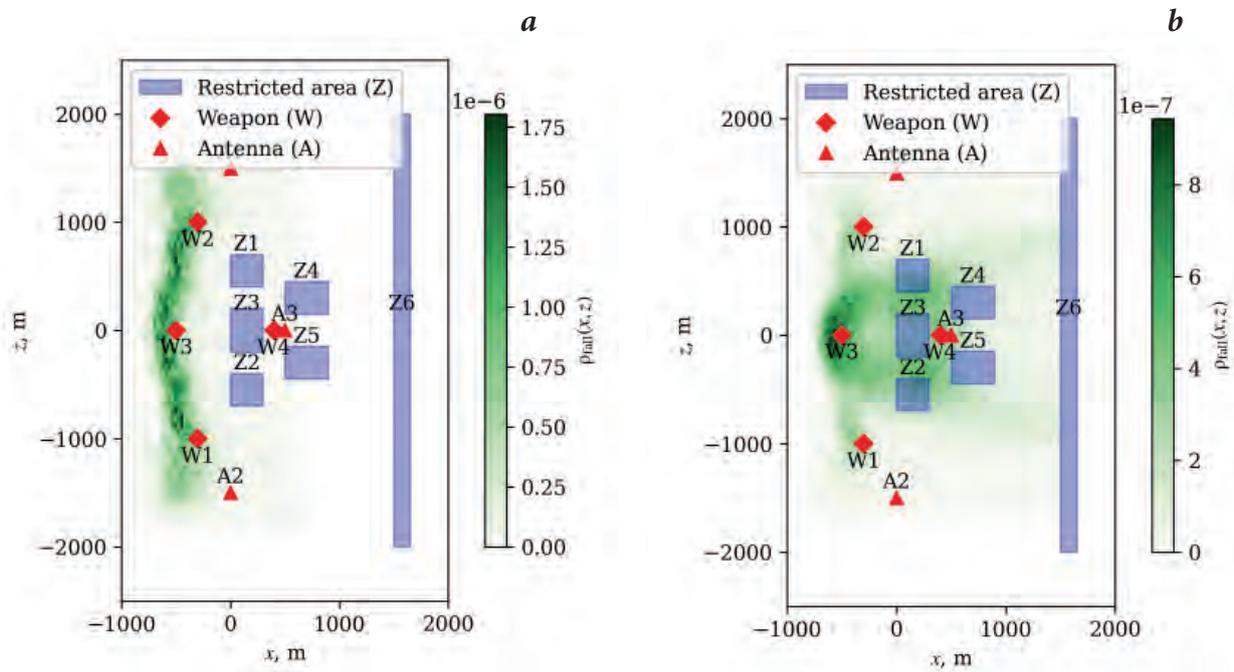


Fig. 3. Density function of UAV impact points in the horizontal plane in case of: a – $N_d=3$; b – $N_d=21$.

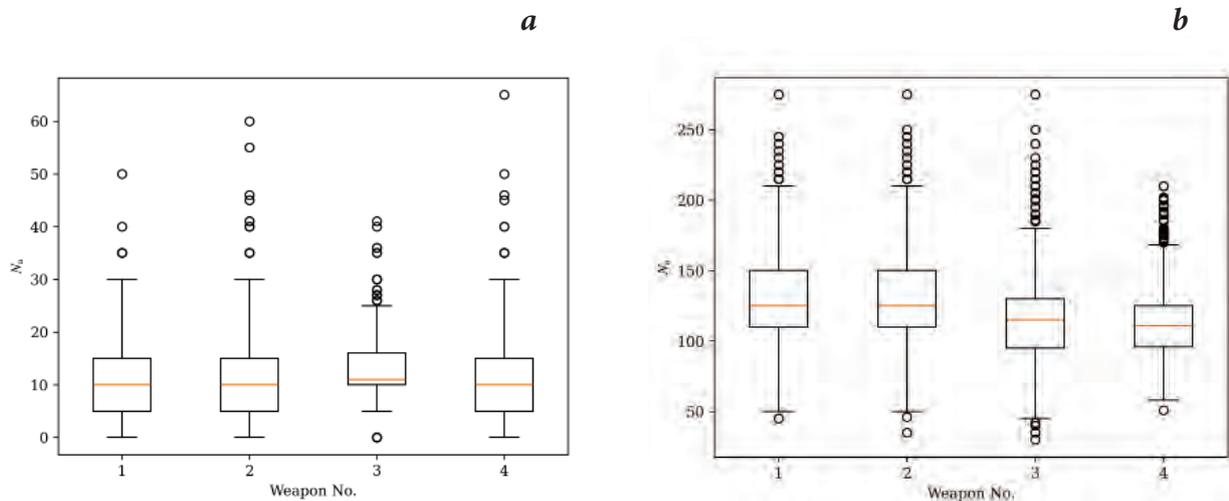


Fig. 4. Ammunition consumption N_a in case of: a – $N_d=3$; b – $N_d=21$

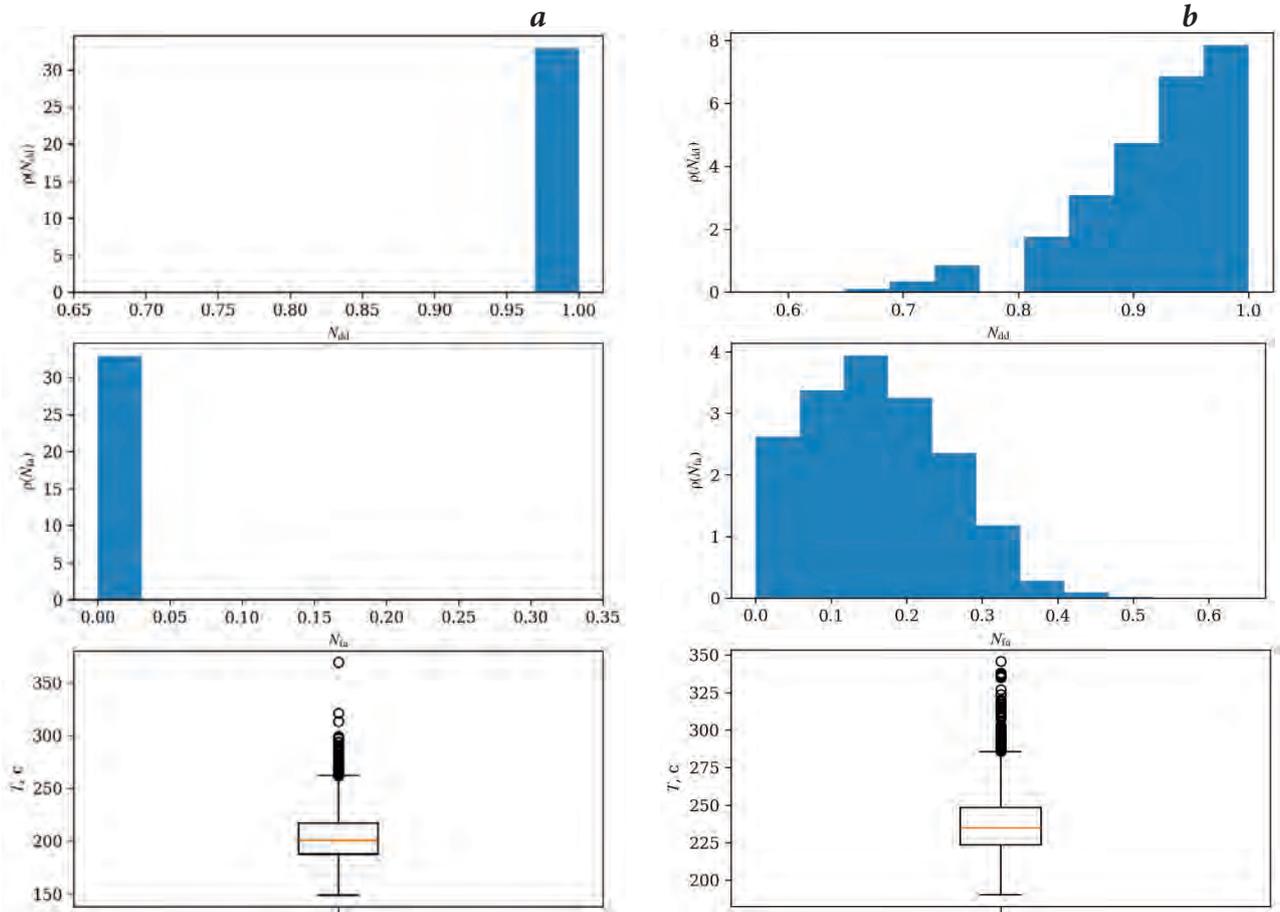


Fig. 5. Distributions ρ of the number of affected UAVs N_{dd} , UAVs that fell into the zones N_{fa} and the countermeasures system task elapsed time T in case of: a - $N_d=3$; b - $N_d=21$. In this instance, the values N_{dd} and N_{fa} are marked on the axes relative to the number of simultaneously flying UAVs N_d .

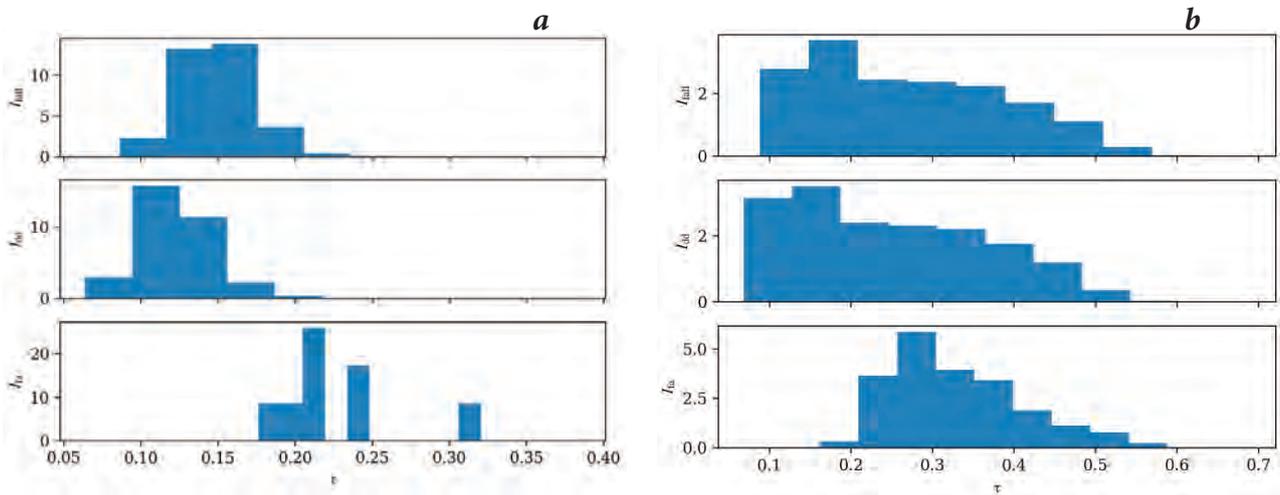


Fig. 6. Distributions of UAVs fall intensity I_{fall} , UAVs defeat intensity I_{dd} and destroyed UAVs intensity of fall into restricted areas I_{fa} depending on the relative simulation time in case of: a - $N_d=3$; b - $N_d=21$.

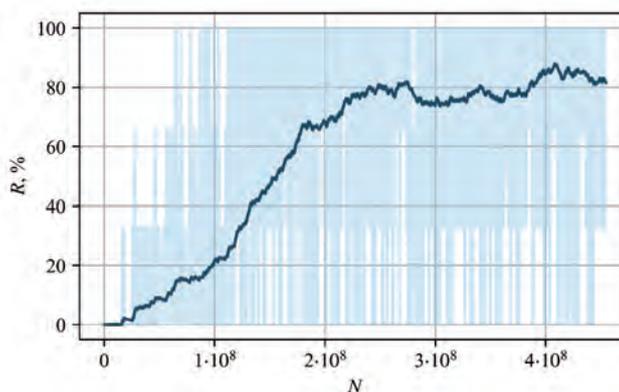


Fig. 7. Progress in training an intelligent agent controlling UAV interceptors in a swarm: R – number of successfully intercepted UAVs, N – training algorithm steps.

References

1. S. Agrawal, A.M. Schuster, N. Britt, E.A. Mack, M.L. Tidwell, S.R. Cotten
Technol. Soc., 2023, **72**, 102186. DOI: 10.1016/j.techsoc.2022.102186.
2. I. Begishev, D. Bersei, O. Amvrosova, K. Dolgopolov, R. Zhirov
In *Proc. Transp. Res. Procedia (RF, Novosibirsk, 02–05 March, 2022)*, RF, Novosibirsk, 2022, **63**, pp. 648–655.
DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.058.
3. E. Papadimitriou, H. Farah, G. van de Kaa, F. S. de Sio, M. Hagenzieker, P. van Gelder
Accid. Anal. Prev., 2022, **174**, 106724.
DOI: 10.1016/j.aap.2022.106724.
4. R.I. Meneguette, R.E. De Grande, A.A.F. Loureiro
Intelligent Transport System in Smart Cities, FRG, Cham, Springer, 2018, 191 pp. DOI: 10.1007/978-3-319-93332-0.
5. B.S. Kerner
The Physics of Traffic, FRG, Berlin, Heidelberg, Springer, 2004, 682 pp.
DOI: 10.1007/978-3-540-40986-1.
6. M. Treiber, A. Kesting
Traffic Flow Dynamics, FRG, Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, 503 pp.
DOI: 10.1007/978-3-642-32460-4.
7. *Introduction to Mathematical Modeling of Traffic Flows [Vvedeniye v matematicheskoye modelirovaniye transportnykh potokov]*, Ed. A.V. Gasnikov, RF, Moscow, Publ. House MTsNMO, 2013, 429 pp. (in Russian).
8. K. AL-Dosari, Z. Hunaiti, W. Balachandran
Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023, **7(3)**, 210.
DOI: 10.3390/drones7030210.
9. S.H. Alsamhi, O. Ma, M.S. Ansari, F.A. Almalki
IEEE Access, 2019, **7**, 128125.
DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2934998.
10. H. Chen, Z. Hu, S. Solak
Eur. J. Oper. Res., 2021, **294(3)**, 118.
DOI: 10.1016/j.ejor.2021.02.039.
11. I. Bisio, C. Garibotto, H. Haleem, F. Lavagetto, A. Sciarone
IEEE Access, 2022, **10**, 101537.
DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3207282.
12. S. Park, H.T. Kim, S. Lee, H. Joo, H. Kim
IEEE Access, 2021, **9**, 42635. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3065926.
13. J.P. Yaacoub, H. Noura, O. Salman, A. Chehab
IoT, 2020, **11**, 100218. DOI: 10.1016/j.iot.2020.100218.
14. M.A. Demyanovich
Legal Order: History, Theory, Practice [Pravoporyadok: istoria, teoria, praktika], 2019, **2(21)**, 108 (in Russian).
15. V.K. Abrosimov
Groups of Intelligent Aircrafts: Monograph [Kollektivnyye intellektualnykh letatelnykh apparatov: Monografiya], RF, Moscow, Izdatelskiy Dom «Nauka», 2017, 304 pp. (in Russian).
16. J. Johnson
Artificial Intelligence and the Future of Warfare: The USA, China, and Strategic Stability, UK, Manchester University Press, 2021, 230 pp. DOI: 10.7765/9781526145062.00015.
17. J.J. Roldan, P. Garcia-Aunon, E. Peña-Tapia, A. Barrientos
In *2019 International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2022) (Japan, Kyoto, 11–15 March, 2019)*, 2019, pp. 862–867.
DOI: 10.1109/PERCOMW.2019.8730677.
18. D. He, G. Yang, H. Li, S. Chan, Y. Cheng, N. Guizani
IEEE Network, 2021, **35(1)**, 380. DOI: 10.1109/MNET.011.2000380.
19. K.K. Oh., M.C. Park, H.S. Ahn
Automatica, 2015, **53**, 424. DOI: 10.1016/j.automatica.2014.10.022.
20. A.A. Bandala, R.R.P. Vicerra, E.P. Dadios
In *Proc. TENCON 2014 – 2014 IEEE Region 10 Conference, (Thailand, Bangkok, 22–25 October, 2014)*, Thailand, Bangkok, IEEE, 2014, pp. 1–6.
DOI: 10.1109/TENCON.2014.7022455.
21. K. Nagel, M. Schreckenberg
J. Phys. I France, 1992, **2(12)**, 2221. DOI: 10.1051/jp1:1992277.
22. A. Dupuis, B. Chopard
Networks Spat. Econ., 2003, **3(1)**, 9. DOI: 10.1023/A:1022044932736.
23. S. Sakai, K. Nishinari, S. Iida
J. Phys. A. Math. Gen., 2006, **39(50)**, 15327.
DOI: 10.1088/0305-4470/39/50/002.
24. N.V. Bykov
Comput. Res. Model., 2022, **14(5)**, 1041.
DOI: 10.20537/2076-7633-2022-14-5-1041-1058.
25. A.N. Lebedinets
Organization and Combat Capabilities of Small-Scale Motorized Rifle Units [Organizatsiya i boevye vozmozhnosti motostrelkovykh podrazdeleniy malogo masshtaba], RF, Moscow, Izdatelstvo Bauman MGTU, 2012, 108 pp. (in Russian).
26. V.A. Fedulov, N.V. Bykov, V.D. Baskakov
Systems of Control, Communication and Security [Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti], 2023, №4, 63 (in Russian).
DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-63-104.
27. A.T. Azar, A. Koubaa, N. Ali Mohamed, H.A. Ibrahim, Z.F. Ibrahim, M. Kazim, A. Ammar, B. Benjdira, A.M. Khamis, I.A. Hameed, G. Casalino
Electronics, 2021, **10(9)**, 999. DOI: 10.3390/electronics10090999.
28. A. Kuznetsov, P. Shvechikov, A. Grishin, D. Vetrov
In *Proc. 37th International Conference on Machine Learning (Virtual, 13–18 July, 2020)*, Online, PMLR 119, 2020, pp. 5556–5566.
(https://proceedings.mlr.press/v119/kuznetsov20a/kuznetsov20a.pdf).
29. M.S. Tovarnov, N.V. Bykov
In *Proc. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 2308 (CMMASS 2021), (RF, Alushta, 04–13 September 2021)*, RF, Alushta, IOP Publishing, 2022, 012004.
DOI: 10.1088/1742-6596/2308/1/012004.
30. A. Raffin, A. Hill, A. Gleave, A. Kanervisto, M. Ernestus, N. Dormann
J. Mach. Learn. Res., 2021, **22(268)**, pp. 1–8.
(https://jmlr.org/papers/volume22/20-1364/20-1364.pdf).

Методология создания системы управления воздушным движением беспилотных транспортных средств «умного города» на основе мониторинга их траекторных параметров многопозиционными локационными комплексами с разнородными элементами*

И.Ю. Гришин, Р.Р. Тимиргалеева

Проблема использования и развития воздушного пространства «умного города» обусловлена тем, что в нем наряду с пилотируемыми летательными аппаратами используются беспилотные летательные аппараты (БПЛА), которые могут решать задачи перемещения грузов, мониторинга территорий и т. д. Целью работы явилась разработка основных положений теории управления воздушным движением БПЛА для безопасной интеграции таких летательных аппаратов в воздушное движение «умного города» с существующими в нем пилотируемыми летательными аппаратами на основе мониторинга с применением разнородных средств локации, имеющихся на территории и вновь создаваемых, которые объединяются в единую систему, являющуюся источником информации о воздушных объектах для системы управления воздушным движением. В работе решены задачи системного анализа управления воздушным движением, формирования требований к подсистеме мониторинга БПЛА, разработана методология создания такой подсистемы на основе многопозиционного локационного комплекса с разнородными источниками информации, включающая методы классификации воздушных объектов по набору траекторных параметров, методы рекуррентной адаптивной фильтрации измерений динамических параметров интенсивно маневрирующих БПЛА, а также методы управления указанной подсистемой мониторинга.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, управление воздушным движением, умный город, многопозиционный локационный комплекс.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-29-06081).

Введение

Прежде всего, важно отметить, что президент Российской Федерации по итогам мероприятий по вопросам развития беспилотных авиационных систем [1], состоявшихся 27 апреля 2023 года, утвердил 13 июня 2023 г. перечень поручений, в которые включен пункт 1-б – «принять исчерпывающие меры по интеграции беспилотных воздушных судов в единое воздушное пространство Российской Федерации, рассмотрев в том числе вопрос о цифровой трансформации организации воздушного движения в части, касающейся си-

стем обслуживания воздушного движения, навигации, посадки, наблюдения, связи и противодействия противоправному применению беспилотных авиационных систем». Это говорит об особой актуальности данной работы, а также полученных результатов, которые должны перейти в сферу практикоориентированных исследований и опытно-конструкторских работ.

Отечественные ученые и практики последовательно занимаются исследованиями, направленными на применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в различных областях [2–4], а также вопросами управления беспилотниками [5–7] и правовыми вопросами их использования [8].

Сформировано направление исследований применения многопозиционной радиолокации в современных условиях [9]. При этом один из основателей современной отечественной многопозиционной радиолокации В.С. Черняк отмеча-



ГРИШИН
Игорь Юрьевич
профессор, академик РАН,
Московский государственный
университет
им. М.В. Ломоносова



ТИМИРГАЛЕЕВА
Рена Ринатовна
профессор,
Крымский федеральный
университет
им. В.И. Вернадского

ет, что на протяжении всей истории развития радиолокации наблюдается тенденция роста канальности РЛС с целью увеличения объема и повышения качества радиолокационной информации [10]. Особенно заметной стала эта тенденция после появления антенных решеток. В последние годы наметилось новое направление развития многоканальных РЛС: так называемые «ММО РЛС». Авторами рассмотрены ММО РЛС и их связь с другим классом многоканальных РЛС – многопозиционными РЛС (МПРЛС).

Обзор технологий мониторинга и противодействия несанкционированным БПЛА представлен в работе [11]. Приведены примеры наиболее удачных решений в области радиолокации дронов с малой эффективной площадью рассеивания (ЭПР), вплоть до 0.01 м^2 . Рассмотрена интеграция технологий противодействия дронам в единую систему.

В работе [2] утверждается, что увеличение длительности полета БПЛА является важной задачей мобильной робототехники. Для достижения этой цели может использоваться автоматизация перезарядки БПЛА с помощью наземных станций обслуживания. Подобный робототехнический комплекс (станция и БПЛА) востребован для охраны и мониторинга объектов различной инфраструктуры. Однако эффективность системы зависит от оптимального количества станций и их расположения для мониторинга заданной площади. В данной работе предложен интеллектуальный алгоритм расчета искомым параметров, основанный на комбинировании имитационного моделирования и генетического алгоритма поиска. Входами алгоритма являются координаты зоны мониторинга и областей, запретных для полетов БПЛА; вероятности проникновения нарушителей на охраняемую территорию через внешний периметр; информация о скорости движения и зарядки БПЛА, количестве дронов, хранимых и обслуживаемых на одной станции; скорость движения нарушителя и частота инцидентов. В ходе многократного имитационного моделирования процесса вторжения в рассматриваемую область и перехвата цели с помощью БПЛА происходит оптимизация расположения станций обслуживания. Данный подход следует парадигме обучения с подкреплением. В качестве функции оптимизации используется соотношение эффективного полетного времени для сопровождения цели к общему времени, проведенному всеми БПЛА в воздухе. На основе заданного значения критерия оптимизации происходит подбор минимального числа станций, способных решать требуемую задачу охраны и мониторинга. А в [12] проблема совместного обмена информацией и контроля изучается для роя из трех сотовых БПЛА, расположенных в треугольной формации. В частности, предлагается новый подход для оптимизации работы роя с одновременным учетом задержки беспроводной сети и стабильности системы управления. На основе этого подхода определяется максимально допустимая задержка, необходимая для предотвращения нестабильности роя.

Китайские авторы [13] исследовали некоторые аспекты наблюдения за БПЛА. Предлагаются методы обработки ин-

формации в условиях наблюдения за БПЛА в городской среде; отмечается, что условия очень нестабильные и возможны пропуски измерений. Предлагается модификация фильтра Калмана, позволяющего частично комплексировать данные из нескольких источников. Авторы из Словакии исследуют общие проблемы «умных городов» [14]. Отмечено, что лидеры среди «умных городов» – Сингапур и Лондон, за ними следует Хельсинки. «Умные города» используют в своей практике 12 выявленных передовых технологий. Стратегическое управление в Сингапуре, Лондоне и Хельсинки адаптирует технологии к нуждам и требованиям своих граждан, таким образом соединяя технологический аспект с управленческим и социальным аспектами. Указанное исследование проводилось в сравнении с новым словацким «умным городом».

Таким образом, отмечена тенденция увеличения интенсивности работ в части решения проблем «умных городов» в целом, а также серьезных проблем обеспечения безопасности воздушного движения в пространстве таких городов. Появились отдельные работы, направленные на комплексирование информации РЛС УВД. Однако пока они носят только начальный характер и предлагают использовать радиолокаторы, работающие в одном диапазоне, что не позволит в полной мере использовать все преимущества многопозиционного режима. Следовательно, комплексного подхода к решению проблемы информационного обеспечения системы УВД «умных городов» пока не предложено. При этом отдельные появившиеся работы подтверждают правильность избранного авторами научного направления.

Целью исследования явилась разработка основных положений теории управления воздушным движением БПЛА для безопасной интеграции таких летательных аппаратов в воздушное движение «умного города» с существующими в нем пилотируемыми летательными аппаратами

на основе мониторинга с применением разнородных средств локации, имеющихся на территории «умного города» и вновь создаваемых, которые объединяются в единую многопозиционную систему, являющуюся источником информации о воздушных объектах для оперативного уровня системы управления воздушным движением «умного города».

Методы и модели

Рассмотрим основные теоретические положения, использованные для получения следующих ключевых результатов проекта:

- результаты системного анализа, позволившие выявить недостатки существующей системы управления воздушным движением, на основе которых удалось сформулировать требования к отдельным элементам системы, опираясь на методы координации с глобальным показателем самой системы УВД;

- метод идентификации воздушных судов в контролируемом воздушном пространстве, позволяющий снизить зависимость размерности нечеткой сетевой модели верификации соответствующего программного обеспечения от размерности динамических взаимодействующих процессов предметной области, разработанный на базе математического аппарата нечетких раскрашенных сетей Петри;

- новый подход к рекуррентной фильтрации параметров траекторий БПЛА, включая участки интенсивного траекторного маневра. Разработана процедура синтеза адаптивного рекуррентного фильтра на основе принципа разделения;

- методология управления функционированием многопозиционной локационной системы. Разработаны методы и модели оптимального управления динамической системой (локационной системой) на основе математического аппарата принципа максимума в матричном виде.

Основные положения *системного анализа системы управления*

воздушным движением и формирования показателя качества управления для подсистемы информационного обеспечения состоят в следующем [15]. Недостатки существующей системы управления воздушным движением проявляются в недостаточной эффективности управления смешанными потоками летательных аппаратов, наличии в контуре управления человека и невозможности обеспечить более плотный поток с заданной степенью безопасности полетов пилотируемых и беспилотных транспортных средств. Определены направления совершенствования системы управления за счет изменения ее структуры, характеристик контура управления. В качестве главного элемента совершенствования выступает система информационного обеспечения, основанная на применении принципов многопозиционной локации с разнородными элементами, функционирующими на разных физических принципах, которая позволит успешно осуществлять мониторинг движения БПЛА в городе в условиях «затенения» зданиями и другими элементами городского ландшафта в различных климатических условиях.

Обоснованы требования к качеству информационного обеспечения и возможному составу дополнительных информационных средств. Показано [15], что достижение необходимых точностных параметров может быть обеспечено только за счет комплексирования различных средств, их работы в многопозиционном режиме, объединения традиционных радиолокационных средств, применения просветных методов локации, использования пассивной локации, где в качестве источника подсвечивающего сигнала могут использоваться сигналы операторов мобильной связи, цифрового телевидения, навигационных систем GPS, Beidou и отечественной ГЛОНАСС. На основе применения теории многоуровневых иерархических систем произведена декомпозиция существующей системы управления воздушным движением, показаны ее наиболее «узкие» места в условиях появления большого количества БПЛА в воздушном пространстве «умных городов», предложены направления совершенствования существующих элементов системы УВД, а также предложены новые элементы, значительно повышающие эффективность управления воздушным движением и его безопасность [15].

Для подсистемы информационного обеспечения получен показатель качества (1), имеющий монотонную связь с показателем качества системы управления воздушным движением. Указанный показатель имеет экспоненциальную зависимость от суммарной шаровой ошибки оценки параметров сопровождаемых беспилотных летательных аппаратов [15]:

$$J = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T tr \left[\mathbf{h}_i^T(t) \Psi_i(t) \right], \quad (1)$$

где $tr \left[\mathbf{h}_i(t) \Psi_i(t) \right] = \sum_{l=1}^k h_i^{ll}(t) \Psi_i^{ll}(t)$ – след произведения матриц $\mathbf{h}_i(t)$ и $\Psi_i(t)$, который характеризует взвешенную величину погрешности оценивания координат i -го воздушного судна (пилотируемого или беспилотного). При этом весовая

матрица $h_i(t)$ задается в зависимости от способа сопровождения и «допоиска» БПЛА в процессе сопровождения, а также от способа принятия решения на управление воздушным движением; N – количество воздушных судов, обслуживаемых системой управления воздушным движением (в автоматическом режиме или диспетчером); T – временной интервал сопровождения воздушных объектов в процессе управления.

Полученный показатель качества управления подсистемы информационного обеспечения позволяет синтезировать методы и алгоритмы управления информационными средствами.

Суть разработанного *метода идентификации воздушных судов* в контролируемом воздушном пространстве на основе аппарата нечетких раскрашенных сетей Петри состоит в следующем [16].

Специалисты по защите объектов от воздушных угроз выделяют пять типов проблем, которые вызывают БПЛА на территориях, свободных от военных конфликтов:

- опасное сближение с пилотируемой авиационной техникой;
- полеты над участками, где применение авиационной техники запрещено или неуместно, например, над складами горюче-смазочных материалов;
- криминальное применения БПЛА (переброска на территорию или с территории аэропорта наркотиков и контрабанды);
- столкновение БПЛА с различными зданиями и сооружениями;
- совершение террористических актов с использованием БПЛА.

Основной угрозой для гражданской авиации следует считать малоразмерные БПЛА, особенно мультикоптерного типа. Даже незначительная по массе целевая нагрузка в несколько сот граммов способна причинить значительный ущерб. Исходя из того, что вес полезной нагрузки составляет сегодня 10–30% общей массы БПЛА, можно сделать вывод, что основную угрозу в настоящий момент представляют БПЛА весом от трех до двадцати килограммов.

Причиной нарушений правил использования воздушного пространства является также проблема своевременной и правильной классификации воздушных объектов (ВО), в том числе БПЛА. Для выявления ВО, который представляет угрозу, используются когнитивные подходы, в частности, нечеткие меры и множества.

Процедура классификации воздушного объекта по степени «опасности» включает в себя три этапа:

- формирование и динамическое обновление баз знаний системы контроля воздушного пространства, содержащих информацию, необходимую для определения категорий ВО, прежде всего, описание образов различных категорий ВО;
- совместная обработка и обобщение координатной, полетной, индивидуальной признаковой и другой информа-

ции о ВО, поступающей от источников различного назначения и физической природы;

– определение категорий ВО (собственно классификация ВО по степени «опасности»).

На базе математического аппарата нечетких раскрашенных сетей Петри разработан метод идентификации воздушных судов в контролируемом воздушном пространстве, позволяющий снизить зависимость размерности нечеткой сетевой модели верификации соответствующего программного обеспечения от размерности динамических взаимодействующих процессов предметной области [16]. Предложена база нечетких продукционных правил нечеткой логической системы классификации воздушных объектов в процессе контроля использования воздушного пространства, а также разработан обобщенный алгоритм реализации этих правил. Структурно нечеткие продукционные правила при этом отвечают правилам нечеткой логической модели Sugeno первого порядка. Такое представление процесса классификации воздушных объектов с использованием нечеткой логической модели позволяет учесть как нестохастический, так и субъективный характер процесса принятия решения оператором. Разработанный обобщенный алгоритм реализации нечетких продукционных правил в рамках модели Sugeno первого порядка является основой для создания программного обеспечения нечеткой логической системы классификации воздушных объектов.

Автоматизированная классификация выполняется согласно таким правилам:

- класс «свой» присваивается автоматически после определения оператором факта взлета воздушного объекта, выявления и взятия его на сопровождение и по результатам оценки воздушной обстановки, которая отображается на средствах отображения индивидуального и коллективного пользования;

– класс «контрольный» присваивается автоматически по решению оператора тем воздушным объектам, которые являются своими и вылетели для обучения, тренировки и т. п.;

– класс «нарушитель государственной границы» присваивается автоматически или по решению оператора тем воздушным объектам, для которых нет корреляции с «планом полетов» и которые являются иностранными и для которых выявлен факт пересечения государственной границы;

– класс «воздушный противник» присваивается автоматически или по решению оператора исходя из воздушной обстановки, которая складывается в данной зоне контроля воздушного пространства.

Формально правила классификации воздушных объектов, которые определяют матрицу отношений, задаются в виде совокупности таких нечетких продукционных правил.

Значение множества характеристик воздушного объекта $\{C_i^e\}$ и классы воздушных объектов множества $\{K_i^e\}$ находятся между собой в бинарном отношении (2):

$$F : X \rightarrow \{K_i^e\}, \tag{2}$$

где F – множество всех выявленных воздушных объектов; X – воздушный объект с номером N_i^e , $i = \overline{1, L}$, L – количество выявленных воздушных объектов; K_i^e – класс воздушного объекта, $i = \overline{1, 10}$.

Указанные отношения задаются соответствующей матрицей отношений (3):

$$\rho = [d_{ji}]_{m \times n}, \tag{3}$$

где m – количество значений характеристик воздушных объектов; n – количество классов воздушных объектов.

В состав непосредственно обобщенного алгоритма реализации нечетких продукционных правил классификации воздушного объекта (результатов нечеткого логического вывода на соответствующей базе правил) входят такие алгоритмы решения частных задач на основе исполь-

зования механизмов нечеткого логического вывода Sugeno нулевого порядка [16]:

– алгоритм решения частной задачи автоматической классификации воздушного объекта по их характеристикам;

– алгоритм решения частной задачи автоматизированной классификации воздушного объекта по их характеристикам.

Разработан **новый метод адаптивной рекуррентной фильтрации** параметров траекторий БПЛА, включая участки интенсивного траекторного маневра, который позволяет осуществлять устойчивое сопровождение пилотируемых и беспилотных ВО в воздушном пространстве «умного города». Базируется данный метод на принципе разделения, при этом структура предложенного адаптивного фильтра имеет следующий вид (рис. 1) [17]:

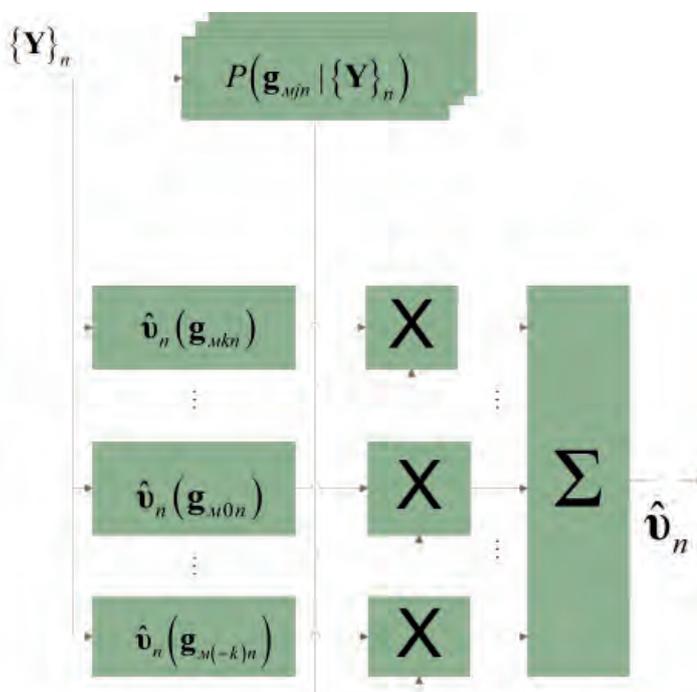


Рис. 1. Структура адаптивного рекуррентного фильтра.

Из анализа рис. 1 следует, что оптимальная оценка вектора параметров наблюдаемого объекта \hat{v}_n представляет собой взвешенную сумму оценок параметров $\hat{v}_n(g_{mjn})$, соответствующих j -й возможной модели динамики наблюдаемого объекта (движения объекта с параметром интенсивности маневра g_{mjn}). При этом в качестве весового коэффициента выступает условная вероятность $P(g_{mjn} | \{Y\}_n)$ обнаружения наблюдаемого объекта в j -м состоянии в текущий n -й момент времени:

$$\hat{v}_n = \sum_{j=-k}^k \hat{v}_n(g_{mjn}) P(g_{mjn} | \{Y\}_n), \tag{4}$$

где $\{Y\}_n$ – множество измерений параметров движения БПЛА в n -й момент времени.

Основное содержание важнейшего результата проекта – **методологии управления функционированием много-**

позиционной локационной системы мониторинга движения БПЛА в воздушном пространстве «умного города» – состоит в следующем [18].

Показано, что модифицированный показатель качества управления системой разнородных локационных средств имеет вид [18]:

$$J = \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{t=1}^T \text{tr}(\mathbf{h}_i(t) \Psi_i(t)) + \sum_{j=1}^M \sum_{t=0}^T [\alpha^{ij}(t) \Gamma_j(t) + \alpha^{ij}(t)(1-x^{ij}(t))\gamma_j(t)] \right\} = \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{t=1}^T \text{tr}(\mathbf{h}_i(t) \Psi_i(t)) + \sum_{t=0}^{T-1} \sum_{j=1}^M \alpha^{ij}(t) [\Gamma_j(t) + (1-x^{ij}(t))\gamma_j(t)] \right\}. \quad (5)$$

Поскольку модели движения объектов в течение периода наблюдения обычно изменяются слабо, характеристики (в том числе точностные) каналов наблюдения за ВО также не изменяются, поэтому временной аргумент при матрицах экстраполяции $\Phi_i(t)$, наблюдения $\mathbf{H}_j(t)$ и ковариационной матрицы ошибок измерения $\mathbf{R}_j(t)$ можно опустить, тогда уравнения состояния динамической системы мониторинга будут иметь вид [18]:

$$\begin{aligned} \Psi_i(t+1) - \Psi_i(t) &= \mathbf{F}_i(t, \Psi_i(t), \alpha(t)) = \Phi_i \Psi_i(t) \Phi_i^T - \\ &- \Psi_i(t) - \Phi_i \Psi_i(t) \Phi_i^T \times \\ &\times \sum_{j=1}^M \left\{ \alpha^{ij}(t) \mathbf{H}_j^T (\mathbf{H}_j \Phi_i \Psi_i(t) \Phi_i^T \mathbf{H}_j^T + \right. \\ &\left. + \mathbf{R}_j)^{-1} \mathbf{H}_j \right\} \Phi_i \Psi_i(t) \Phi_i^T, \\ \mathbf{X}(t+1) - \mathbf{X}(t) &= \mathbf{F}_{N+1}(t) = \alpha(t) - \mathbf{X}(t), \\ \Psi_i(0) &= \Psi_{i0}, \mathbf{X}(0) = 0, i = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T-1. \end{aligned} \quad (6)$$

В таком случае задача управления разнородным измерительным комплексом в режиме наблюдения за ВО заключается в минимизации функционала (5) по матрице управления $\alpha(t)$.

Предложен метод решения данной оптимизационной задачи на основе математического аппарата дискретного аналога принципа максимума в матричном виде в комбинации с методом последовательных приближений и случайного поиска [18].

На базе рассмотренных методов в ходе реализации проекта разработаны алгоритмы, реализованные программно в виде статистической модели для оценки качества принятых решений в ходе теоретической работы [18].

Результаты и обсуждение

Структура комплексной имитационной модели функционирования измерительного информационного комплекса мониторинга движения пилотируемых аппаратов и БПЛА, которая создана для оценки эффективности разработанных методов, представлена на рис. 2.

В качестве базовой системы для реализации представленной на рис. 2 модели была выбрана система имитационного моделирования AnyLogic [19], так как она позволяет применить несколько подходов к моделированию систем и эффективно управлять процессом моделирования.

Произведена оценка метода идентификации воздушных судов в контролируемом воздушном пространстве на базе математического аппарата нечетких раскрашенных сетей Петри. Разработанный обобщенный алгоритм реализации нечетких продукционных правил в рамках модели Sugeno первого порядка является основой для создания программного обеспечения нечеткой логической системы классификации воздушных объектов «умного города». Результаты моделирования показали повышение качества классификации на 20–40% относительно традиционных алгоритмов классификации.

Построена модель работы синтезированных адаптивных фильтров и осуществлен сравнительный анализ предложенных фильтров с традиционными, который показал повышение точности оцениваемых траекторных параметров БПЛА на 50–70% на участке интенсивного траекторного маневра. При этом оценены разработанные алгоритмы обработки траекторной информации интенсивно маневрирующих БПЛА, а также обеспечение их устойчивого сопровождения [20].

В зависимости от возможных маневренных характеристик БПЛА применимы следующие подходы: ускорение считается случайным процессом и может оцениваться статистическими методами (ускорение представляет собой случайную, распределенную по нормальному закону переменную с нулевым средним и заданной дисперсией, предполагается некоррелированность величин ускорений в разные моменты времени); ускорение является детерминированным процессом и оценивается в реальном времени по результатам наблюдения за БПЛА (лучше учесть-

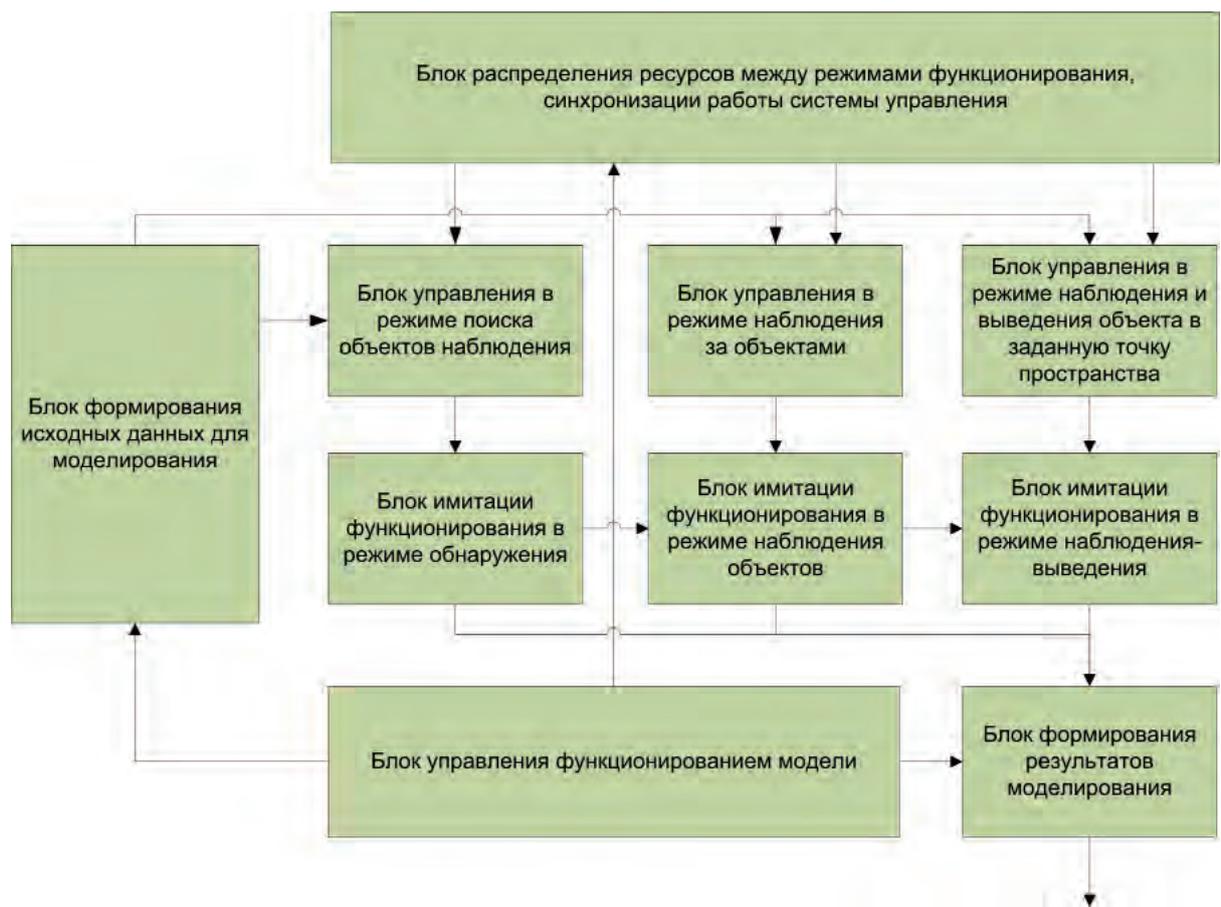


Рис. 2. Комплексная имитационная модель функционирования.

вает реальные особенности маневра БПЛА модель на основе коррелированного случайного процесса с нулевым математическим ожиданием и недиагональной корреляционной матрицей интенсивностей маневра). В первом случае (обычно для небольших интенсивностей возможного маневра) могут использоваться различные, в том числе авторские, модификации рекуррентных фильтров, а во втором – фильтры с обнаружителем маневра, но лучше – адаптивные [20].

Осуществлена оценка разработанных методов управления функционированием многопозиционной разнородной локационной системы [18]. Рассмотрены методы и модели оптимального управления динамической системой (локационной системой) на основе математического аппарата принципа максимума в матричном виде, для решения использован комплексный метод последовательных приближений (в авторском варианте), поскольку оптимизируемая система является нелинейной.

Разработаны и реализуемые на практике локально-оптимальные методы, и алгоритмы, имеющие невысокую вычислительную сложность.

Главным показателем эффективности разработанных методов управления является повышение пропускной способности такой системы только за счет разработанно-

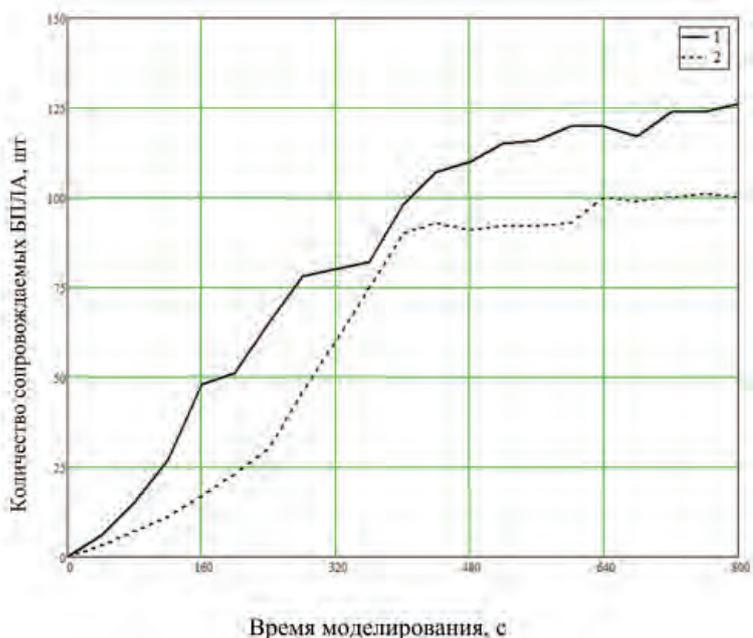


Рис. 3. Оценка производительности системы мониторинга: пунктир (---) – традиционные методы, сплошная линия (—) – предложенные методы.

го программно-алгоритмического обеспечения системы управления. На *рис. 3* приведены сравнительные зависимости пропускной способности системы мониторинга, из которых видно, что пропускная способность увеличивается на 15–30%, при этом чем более плотный поток БПЛА в контролируемой области, тем больший выигрыш в производительности получен [18].

Выводы

Проведенное исследование позволило разработать основные положения теории управления воздушным движением беспилотных летательных аппаратов для их безопасной интеграции в воздушное пространство «умного города» с существующими в нем пилотируемыми летательными аппаратами на основе мониторинга с применением разнородных средств локации, имеющихся на территории «умного города» и вновь создаваемых, которые объединяются в единую многопозиционную систему, являющуюся источником информации о воздушных объектах для оперативного уровня системы управления воздушным движением «умного города».

Показано, что современные измерительные информационные системы чаще всего оказываются сложными, и к ним классические методы управления неприменимы. Наиболее эффективным средством их изучения и управления ими является системный подход. Для разработки эффективной системы управления предложена адекватная модель управляемой системы. При этом обоснование показателя качества управления является одной из наиболее важных задач, которая была решена при синтезе методов управления таким важным классом сложных систем, как измерительные информационные системы.

Предложена иерархическая четырехуровневая система классификации воздушных объектов, позволяющая определить опасные воздушные объекты, которые нуждаются

в особом внимании со стороны операторов. При этом применение указанного метода позволяет повысить качество классификации на 20–40% относительно традиционных алгоритмов классификации.

Показано, что наиболее эффективным инструментом для мониторинга движения беспилотных летательных аппаратов в процессе воздушной навигации и управления воздушным движением являются статистические измерительные информационные системы, позволяющие с заданным уровнем точности определять составляющие вектора положения, скорости и других параметров летательного аппарата.

Получено решение задачи оптимизации параметров режима сопровождения радиолокационного комплекса, которое сводится к выбору оптимального темпа локации и, в отличие от ранее известных результатов, определяет адаптивное управление темпом локации в зависимости от степени неопределенности в знании динамики цели и уровня шумов в канале измерений, а также временного ресурса, выделенного на сопровождение цели. В результате пропускная способность увеличивается на 15–30%, при этом выигрыш возрастает с увеличением плотности потока БПЛА в контролируемой области.

Литература

1. *Перечень поручений по итогам участия Президента в мероприятиях по вопросам развития беспилотных авиационных систем*, утв. Президентом РФ 13.06.2023 №Пр-1176. (<http://kremlin.ru/acts/assignments/orders/71423>).
2. **И.Ю. Данилов, И.М. Афанасьев**
В Труды Пятого Всероссийского научно-практического семинара «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2019): Труды семинара (РФ, Санкт-Петербург, 22–24 мая, 2019), РФ, Переславль-Залесский, Российская ассоциация искусственного интеллекта, 2019, с. 181–190. (http://www.ai-uv.ru/images/aiuv2019/proc/aiuv2019_book.pdf).
3. **Н.Н. Долженков, Д.Г. Пантенков, В.П. Литвиненко, А.А. Ломакин, А.Т. Егоров, А.А. Гриценко**
Вестник Воронежского государственного технического университета, 2019, 15(3), 102. DOI 10.25987/VSTU.2019.15.3.015.
4. **I.Yu. Grishin, R.R. Timirgaleeva, V.V. Selivanov, A.N. Kazak**
В E3S Web of Conferences, 2023, 376, 04034. DOI: 10.1051/e3sconf/202337604034.
5. **А.М. Горюнова, В.А. Шестаков**
Теория и практика современной науки, 2018, №2(32), 466. (https://www.modern-j.ru/_files/ugd/b06fdc_a2a7b9195e1a4dfcb7cd68a0b61f3ae5.pdf?index=true).
6. **Н.В. Рощина**
Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны, 2019, №1(4), 68.
7. **Ю. Гриднев, Ю. Яцына, А. Русецкий, С. Пручковский**
Наука и инновации, 2017, №2(168), 17.
8. **Р.П. Кошкин**
Научный вестник ГосНИИ ГА, 2015, №11(322), 23.
9. **Г.А. Еришов, В.А. Завьялов, В.А. Синецких**
В Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды одиннадцатой общероссийской научно-практической конференции, в 2 тт., Сер. «Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ»», РФ, Санкт-Петербург, 2019, с. 21–24.
10. **В.С. Черняк**
Успехи современной радиоэлектроники, 2011, №2, 5.
11. **А.В. Швецов**
Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, 2019, №5, 89.

12. Д.Ю. Ермилов
В Сб. докл. Российская научно-техническая конференция с международным участием. Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике (РФ, Москва, 11–12 апреля, 2019), РФ, Москва, Изд. Физико-технологический институт РТУ МИРЭА, 2019, с. 182–185.
13. Z. Shi, X. Chang, C. Yang, Z. Wu, J. Wu
IEEE Trans. Veh. Technol., 2020, **69**(3), 2731.
DOI: 10.1109/TVT.2020.2964110.
14. J. Vodak, D. Sulyova
Sustainability, 2021, **13**(10), 5746. DOI: 10.3390/su13105746.
15. И.Ю. Гришин, Р.Р. Тимиргалеева, И.И. Линник
Методология создания системы управления воздушным движением беспилотных транспортных средств, РФ, Майкоп, ООО «Электронные издательские технологии», 2020, 161 с. DOI: 10.34754/EP.2020.14.81.004.
16. I. Linnik, E. Linnik, I. Grishin, R. Timirgaleeva
В Proc. 29th Conference of Open Innovations Association FRUCT, (FI, Tampere, 12–14 May, 2021), FI, Tampere, IEEE Publ., pp. 240–246. DOI: 10.23919/FRUCT52173.2021.9435536.
17. И.Ю. Гришин, Р.Р. Тимиргалеева, В.Г. Морозова
В Мат. Ежегодной научной конференции МГУ «Ломоносовские чтения» (РФ, Севастополь, 12–15 апреля, 2023), РФ, Севастополь, Филиал МГУ в «г. Севастополе», 2023, с. 25–26.
18. И.Ю. Гришин, Р.Р. Тимиргалеева
Управление воздушным движением беспилотных транспортных средств «умного» города на основе мониторинга их траекторных параметров. Монография, РФ, Севастополь, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2023, 223 с. DOI: 10.35103/v8102-7899-8963-m.
19. В.Д. Боев
Прикладная информатика, №4(34), 2011, 50.
20. I. Grishin, R. Timirgaleeva, I. Linnik
В Proc. 30th Conference of Open Innovations Association FRUCT (FI, Oulu, 27–29 October, 2021), pp. 64–70. DOI: 10.23919/FRUCT53335.2021.9599972.

English

Methodology for Creating an Air Traffic Control System for Unmanned Vehicles of a Smart City Based on Monitoring of Their Trajectory Parameters by Multi-Position Location Complexes with Heterogeneous Elements*

Igor Yu. Grishin

Professor,

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
igrishin@sev.msu.ru

Rena R. Timirgaleeva

Professor,

Vernadsky Crimean Federal University
4 Akademik Vernadsky Ave., Simferopol, 295007, Republic of
Crimea, Russia
renatimir@gmail.com

Abstract

The problem of using and developing the airspace of a “smart city” is due to the fact that, along with manned aircraft, unmanned aerial vehicles (UAVs) are used in it, which can solve the problems of moving goods, monitoring territories, *etc.* The purpose of the work was to develop the main provisions of the theory of UAV air traffic control for the safe integration of such aircraft into the air traffic of a “smart city” with existing manned aircraft based on monitoring using heterogeneous means of location, existing on the territory and newly created, which are combined into a single system, which is a source of information about air objects for the air traffic control system. The paper solves the problems of system analysis of air traffic control, the formation of requirements for the UAV monitoring subsystem, the methodology for creating such a subsystem based on a multi-position location complex with heterogeneous sources of information, including methods for classifying air objects according to a set of trajectory parameters, methods of recurrent adaptive filtering of measurements of dynamic parameters of intensively maneuvering UAVs, as well as methods for controlling the specified UAV, as well as methods for controlling the specified UAV monitoring subsystem.

Keywords: unmanned aerial vehicle, air traffic control, smart city, multi-position location complex, optimal control.

*The work was financially supported by RFBR (project 19-29-06081).

Images & Tables

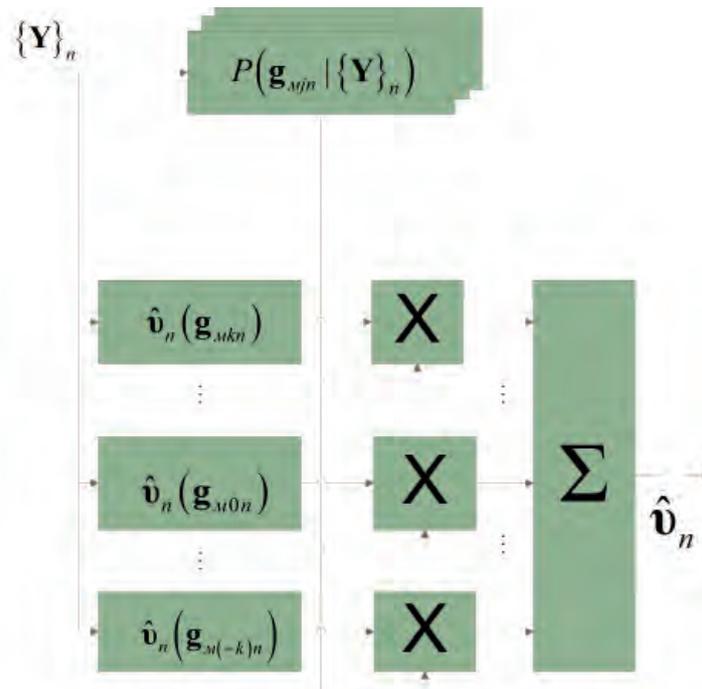


Fig. 1. Structure of an adaptive recurrent filter.

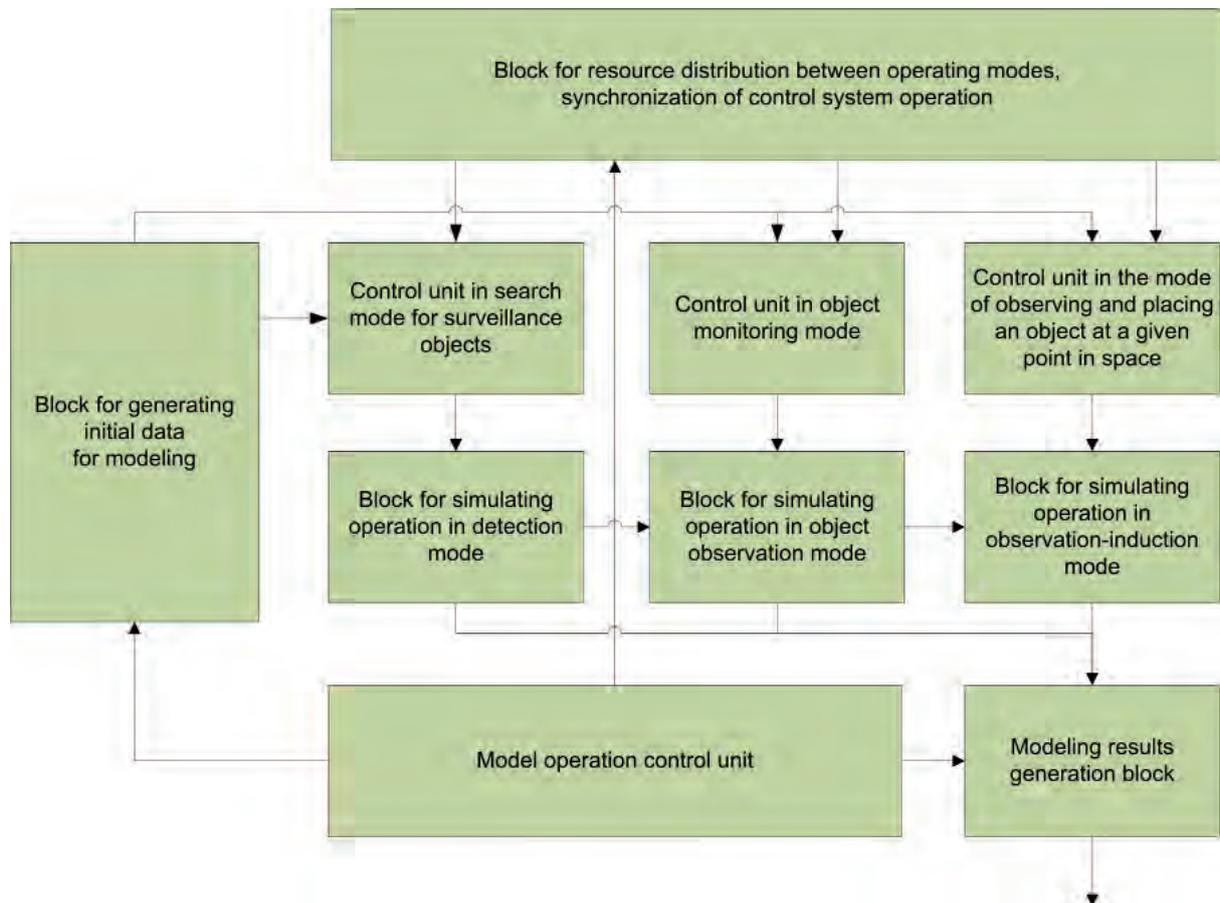


Fig. 2. Complex simulation model of functioning.

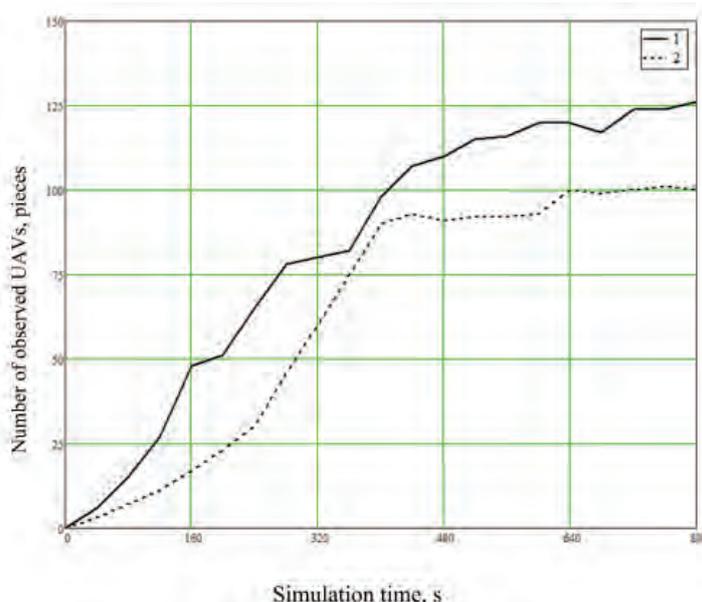


Fig. 3. Evaluation of the monitoring system performance (1 – proposed methods, 2 – traditional methods).

References

1. List of Instructions Based on the Results of the President's Participation in Events on the Development of Unmanned Aircraft Systems, Appr. President of the Russian Federation on 06.13.2023 No. Pr-1176 [Perechen porucheniy po itogam uchastia Prezidenta v meropriyatiyakh po voprosam razvitiya bespilotnykh aviatsionnykh sistem] (in Russian). (<http://kremlin.ru/acts/assignments/orders/71423>).
2. I. Yu. Danilov, I.M. Afanasev
In Proc. Fifth All-Russian Scientific and Practical Seminar "Unmanned Vehicles with Elements of Artificial Intelligence" (BTS-II-2019) [Trudy Pyatogo Vserossiiskogo nauchno-prakticheskogo seminaru "Bespilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta"] (RF, St. Petersburg, 22–24 May, 2019), RF, Pereslavl-Zalessky, Russian Association of Artificial Intelligence Publ., 2019, pp. 181–190 (in Russian).
3. N.N. Dolzhenkov, D.G. Pantenkov, V.P. Litvinenko, A.A. Lomakin, A.T. Egorov, A.A. Gritsenko
Bulletin of Voronezh State Technical University [Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta], 2019, 15(3), 102 (in Russian). DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.3.015.
4. I.Yu. Grishin, R.R. Timirgaleeva, V.V. Selivanov, A.N. Kazak
In E3S Web of Conferences, 2023, 376, 04034. DOI: 10.1051/e3sconf/202337604034.
5. A.M. Goryunova, V.A. Shestakov
Theory and Practice of Modern Science [Teoriya i praktika sovremennoy nauki], 2018, №2(32), 466 (in Russian).
6. N.V. Roshchina
Bulletin of the Yaroslavl Higher Military School of Air Defense [Vestnik Yaroslavskogo vysshego voennogo uchilishcha protivovozdushnoi obrony], 2019, №1(4), 68 (in Russian).
7. Yu. Gridnev, Yu. Yatsyna, A. Rusetsky, S. Pruchkovsky
The Science and Innovation [Nauka i innovatsii], 2017, №2(168), 17 (in Russian).
8. R.P. Koshkin
Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation [Nauchny vestnik GoSNII GA], 2015, №11(322), 23 (in Russian).
9. G.A. Ershov, V.A. Zavyalov, V.A. Sinitsyn
In Innovative Technologies and Special-Purpose Technical Means: Proc. Eleventh All-Russian Scientific and Practical Conference [Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva spetsialnogo naznacheniya: Trudy odinadtsatoy obshcherossiiskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii], in 2 Vols, Ser. "Biblioteka zhurnala "Voenmekh. Vestnik BGTU"", Saint Petersburg, 2019, pp. 21–24 (in Russian).
10. V.S. Chernyak
Achievements of Modern Radioelectronics [Uspekhi sovremennoy radioelektroniki], 2011, №2, 5 (in Russian).
11. A.V. Shvetsov
Security and Emergency Issues [Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsii], 2019, №5, 89 (in Russian).
12. D.Yu. Ermilov
In Proc. Russian Scientific and Technical Conference with International Participation. Computer Science and Technology. Innovative Technologies in Industry and Computer Science [Sb. Dokl. Rossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem. Informatika i tekhnologii. Innovatsionnye tekhnologii v promyshlennosti i informatike. Sbornik dokladov konferentsii] (RF, Moscow, 11–12 April, 2019), RF, Moscow, Institute of Physics and Technology RTU MIREA, 2019, pp. 182–185 (in Russian).
13. Z. Shi, X. Chang, C. Yang, Z. Wu, J. Wu
IEEE Trans. Veh. Technol., 2020, 69(3), 2731. DOI: 10.1109/TVT.2020.2964110.
14. J. Vodak, D. Sulyova
Sustainability, 2021, 13(10), 5746. DOI: 10.3390/su13105746.
15. I.Yu. Grishin, R.R. Timirgaleeva, I.I. Linnik
Methodology for Creating an Air Traffic Control System for Unmanned Vehicles [Metodologiya sozdania sistemy upravleniya vozdushnym dvizheniem bespilotnykh transportnykh sredstv], RF, Maykop, OOO "Elektronnyye izdatelskie tekhnologii", 2020, 161 pp. (in Russian).
16. I. Linnik, E. Linnik, I. Grishin, R. Timirgaleeva
In Proc. 29th Conference of Open Innovations Association FRUCT, (FI, Tampere, 12–14 May, 2021), FI, Tampere, IEEE Publ., 2021, pp. 240–246. DOI: 10.23919/FRUCT52173.2021.9435536.
17. I.Yu. Grishin, R.R. Timirgaleeva, V.G. Morozova
In Proc. Annual Scientific Conference of Moscow State University "Lomonosov Readings" [Mat. Ezhegodnoi nauchnoi konferentsii MGU "Lomonosovskie chteniya"] (RF, Sevastopol, 12–15 April, 2023), RF, Sevastopol, Publ. Branch of Moscow State University in Sevastopol, 2023, pp. 25–26 (in Russian).
18. I.Yu. Grishin, R.R. Timirgaleeva
Air Traffic Control of Smart City Unmanned Vehicles Based on Monitoring of Their Trajectory Parameters. Monograph [Upravlenie vozdushnym dvizheniem bespilotnykh transportnykh sredstv «umnogo» goroda na osnove monitoringa ikh traektornykh parametrov: Monografiya], RF, Sevastopol, Lomosov MSU Publ., 2023, 223 pp. (in Russian). DOI: 10.35103/v8102-78998963-m.
19. V.D. Boev
Russ. J. Applied Informatics [Prikladnaya informatika], №4(34), 2011, 50 (in Russian).
20. I. Grishin, R. Timirgaleeva, I. Linnik
In Proc. 30th Conference of Open Innovations Association FRUCT (FI, Oulu, 27–29 October, 2021), pp. 64–70. DOI: 10.23919/FRUCT53335.2021.9599972.

Интегрированная система обеспечения безопасности полетов беспилотных воздушных транспортных средств в едином воздушном пространстве «умного города»*

В.В. Косьянчук, А.А. Обознов, Е.Ю. Зыбин, Ю.В. Бессонова

В работе рассматривается концепция построения интегрированной системы обеспечения безопасности полетов беспилотных воздушных транспортных средств (БВТС) в едином воздушном пространстве «умного города», включающая разработку методов, направленных на обеспечение эксплуатационной безопасности, минимизирующей риски, связанные с отказами оборудования; функциональной безопасности, направленной на устранение рисков, связанных со столкновениями; психофизиологической безопасности, учитывающей управление БВТС с учетом особенностей человека-оператора. В основу методов эксплуатационной и функциональной безопасности положен единый подход, основанный на безмодельной обработке информации о входных и выходных сигналах БВТС. Внедрение такого подхода позволит, прежде всего, масштабировать системы безопасности полетов на различные классы БВТС без необходимости создавать сложные математические модели каждого объекта в отдельности.

Ключевые слова: эксплуатационная безопасность, функциональная безопасность, психофизиологическая безопасность, беспилотные воздушные транспортные средства, «умный город».

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-29-06091).

Введение

Концепция «умного города» в части использования беспилотных воздушных транспортных средств (БВТС) предполагает эффективное использования ресурсов БВТС для управления городской инфраструктурой и удовлетворение потребностей жителей городов, причем к безопасности полетов БВТС предъявляются достаточно высокие требования [1–7].

Для минимизации или устранения рисков эксплуатации БВТС в едином воздушном пространстве «умного города» необходимо создать интегрированную систему обеспечения безопасности полетов БВТС, учитывающую эксплуатационную безопасность, минимизирующую риски, связанные с отказами оборудования; функциональную безопасность, устраняющую риски, связанные со столкновениями; психофизиологическую безопасность, предполагающую управление БВТС с учетом особенностей человека-оператора.

Подобные задачи в сфере безопасности полетов БВТС разрозненно рассматриваются рядом международных организаций, например, JARUS, EUROCAE, EUROCONTROL. Известны и теоретические подходы к решению отдельных задач [8–13]. Например, при решении задачи эксплуатационной безопасности традиционно предполагается наличие полной и достаточной информации, используемой по отдельности в различных бортовых и наземных информационных системах. Для БВТС такие условия трудновыполнимы. Зачастую такая информация отсутствует либо трудно формализуема. В результате неполнота, некорректность, неадекватность данных при-



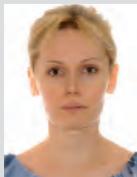
КОСЬЯНЧУК
Владислав Викторович
профессор,
Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем



ОБОЗНОВ
Александр Александрович
профессор,
Институт психологии РАН



ЗЫБИН
Евгений Юрьевич
Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем



БЕССОНОВА
Юлия Владимировна
Институт психологии РАН

водит к недостоверным результатам. Еще более сложны ситуации при возникновении нескольких угроз, в условиях присутствия существенных возмущений, ошибок и неопределенностей, скачкообразных изменений параметров математической модели объекта и внешней среды и т. д. Решение задач функциональной безопасности в практическом плане чаще всего сводится к применению систем предупреждения столкновений, в основу которых положены прямые измерения положения воздушных судов на достаточно большом расстоянии и введении алгоритмов облета по заранее заданным траекториям.

В данной статье рассматривается единый подход к решению рассматриваемых задач, основанный на безмодельной обработке информации о входных и выходных сигналах БВТС. Внедрение такого подхода позволит, прежде всего, масштабировать результаты на различные классы БВТС без необходимости создавать сложные математические модели каждого объекта в отдельности.

В целом, подход носит междисциплинарный характер, интегрируя исследования в области теории управления, идентификации, отказоустойчивости и инженерной психологии при решении задач, связанных с обеспечением безопасности полетов БВТС как полностью автономных, так и использующих интеллектуальные человеко-машинные интерфейсы, с разными уровнями принятия решений.

Методы обеспечения эксплуатационной безопасности

Методы обеспечения эксплуатационной безопасности позволяют обнаруживать отказы в контуре управления БВТС. Причем необходимо сосредоточиться на наиболее критичных отказах с позиции обеспечения безопасности полетов. В группу таких отказов можно отнести отказы двигателя и отказы в системе управления полетом. Обычно БВТС

имеет несколько силовых установок, и в этой связи отказы двигателя не являются критичными, а вот отказы в системе управления могут приводить к серьезным последствиям.

Выделим в системе управления исполнительную, измерительную и вычислительную подсистемы. Вычислительная подсистема обычно имеет трех- или четырехкратное резервирование, и отказ одного из каналов не приводит к потере управляемости. Наиболее критичны отказы в измерительной подсистеме, так как датчики информации не резервированы, а отказ датчика приводит к разрыву обратной связи в контуре управления, что может привести к неустойчивости движения.

В этой связи сформулируем задачу следующим образом. Необходимо построить алгоритм контроля технического состояния измерительной подсистемы БВТС при следующих ограничениях:

- измеряются выходные сигналы системы управления;
- измеряются параметры полета БВТС, причем нет достоверной информации о том, что датчик работает исправно или выдает сигнал, не соответствующий реальному вектору измерений;
- модель системы неизвестна (имеется только допущение, что модель линейна);
- внешние возмущения неизвестны.

Пусть модель динамики полета БВТС представлена в виде [14, 15]

$$x_{i+1} = Ax_i + Bu_i \tag{1}$$

$$y_i = Cx_i + Du_i \tag{2}$$

где x, y, u – вектора состояний, измерений и управлений; A, B, C, D – матрицы собственной динамики, эффективности управления, измерений и прямой связи; i – дискретные моменты времени.

Отказ измерительной подсистемы моделируется введением в уравнение (2) матрицы отказов F в виде

$$y_i = F(Cx_i + Du_i) = FCx_i + FDU_i \tag{3}$$

где $F = \text{diag}([f_1 \dots f_k \dots f_n])$, f_k – элементы матрицы отказов, характеризующие отклонение коэффициентов усиления отказавших каналов измерений от номинальных значений $f_k=1$ ($f_k \neq 1 \neq 0$). В случае, когда $f_k=1$, отказа нет, если $f_k \neq 1$, то произошел отказ.

С учетом сделанных допущений необходимо обнаружить отказ и определить, какой именно датчик отказал, при условии, что параметры модели A, B, C, D не известны, а доступна информация только о сигналах управлений u_i и измерений y_i .

Представим модель (1)–(2) в виде «черного ящика», структура и параметры которого не известны, как показано на рис. 1, где Z – матрица входных сигналов, Y – матрица выходных сигналов.



Рис. 1. Задача «черного ящика».

Будем считать, что задача на *рис. 1* может быть сведена к линейному матричному уравнению $\Omega Z = Y$ с известными матрицами Z и Y .

Известно, что это уравнение разрешимо при выполнении матричного условия [16, 17]:

$$Y\bar{Z}^R = 0, \quad (4)$$

где \bar{Z}^R – правый делитель нуля, удовлетворяющий условию $Z\bar{Z}^R = 0$.

Это условие существует всегда, оно однозначно, единственно и использует только информацию об известных входных и выходных сигналах системы управления. В случае выполнения данного условия можно говорить о том, что входные и выходные сигналы согласованы для данной модели. Если же произошел отказ, меняется оператор системы Ω , и в этот момент входы и выходы системы будут не согласованы. Условие разрешимости выполняться не будет, а это свидетельствует об отказе в системе. По сути, проверяя это условие можно сделать однозначный вывод о том, есть ли в системе отказ или нет.

Используем это свойство для решения задачи обнаружения и локализации отказов. Запишем модель динамики полета БВТС в пространстве состояний (1)–(2) в виде эквивалентной модели типа «вход–выход» [15]:

$$y_i = \Omega z_i, \quad (5)$$

где $\Omega = [\hat{A} \quad \hat{B} \quad \hat{D}]$, $\hat{A} = \begin{bmatrix} \tilde{C}^L \\ \bar{C}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} A \tilde{C}^L$, $\hat{B} = \begin{bmatrix} \tilde{C}^L \\ \bar{C}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} (B - A \tilde{C}^L D)$,

$\hat{D} = D$, $z_i = \begin{bmatrix} y_{i-1} \\ u_{i-1} \\ u_i \end{bmatrix}$, а матрицы \tilde{C}^L и \bar{C}^L обладают следующими

свойствами:

$$\bar{C}^L C = 0, \quad \begin{bmatrix} \tilde{C}^L \\ \bar{C}^L \end{bmatrix} C \begin{bmatrix} \tilde{C}^R & \bar{C}^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Предположим, что в момент времени i нам также известны h предыдущих значений сигналов. Тогда можно записать в матричном виде модель (5) при $i < i_f$

$$Y_i^h = \Omega Z_i^h, \quad (6)$$

где $Z_i^h = [z_{i-h+1} \quad \dots \quad z_{i-1} \quad z_i]$.

Если рассмотреть выражение (6) в виде линейного матричного уравнения, то по аналогии с (4) можно записать его условие разрешимости

$$Y_i^h \bar{Z}_i^h{}^R = 0, \quad (7)$$

которое в момент возникновения отказов при $i_f \leq i \leq i_f + h - 1$ нарушается:

$$Y_i^h \bar{Z}_i^h{}^R \neq 0, \quad (8)$$

что позволяет его использовать в качестве простого непараметрического критерия обнаружения и локализации отказов k -го канала измерительной подсистемы системы управления полетом БВТС

$$\varepsilon_i(k) = Y_i^h(k) \bar{Z}_i^h{}^R = Y_i^h(k) \begin{bmatrix} Y_{i-1}^h \\ U_{i-1}^h \\ U_i^h \end{bmatrix}^R. \quad (9)$$

На практике в качестве скалярного количественного критерия выполнения условия (9), как правило, используется норма Фробениуса

$$\varepsilon_i(k) = \left\| Y_i^h(k) \bar{Z}_i^h{}^R \right\|_2 = \left\| Y_i^h(k) \begin{bmatrix} Y_{i-1}^h \\ U_{i-1}^h \\ U_i^h \end{bmatrix}^R \right\|_2. \quad (10)$$

Модель (1)–(2) не учитывает влияния случайных возмущающих факторов в уравнении состояния. Их влияние обуславливает тот факт, что критерий (10) будет иметь вероятностный характер, и решение об отказе датчика принимается по превышению значения некоторого настраиваемого порога.

Проверка работоспособности критерия (10) осуществлялась на полной нелинейной модели БВТС квадрокоптерного типа со штатной системой управления полетом (СУП) со следующими векторами измерений $y = [V \quad \alpha \quad \Theta \quad \omega_z \quad \beta \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \gamma]^T$ и управлений $u = [u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4]^T$, где V – скорость полета (м/с); α , Θ , γ , β – углы атаки, наклона траектории, крена и скольжения (град); ω_x , ω_y , ω_z – угловые скорости крена, рыскания и тангажа (град/с); u_i – скорости вращения соответствующих двигателей БВТС (град/с). Схема численного моделирования приведена на *рис. 2*.

На *рис. 2* введено понятие накопителя данных, осуществляющего накопление информации о входных и выходных переменных. С математической точки зрения формируются матрицы Y_i , U_i на некотором интервале времени h , названном шириной окна контроля. Ширина окна контроля выбирается в процессе моделирования.

В процессе полета в модуле функционального контроля технического состояния используется критерий с шириной окна контроля $h=17$, гарантирующей время настройки алгоритма, не превы-

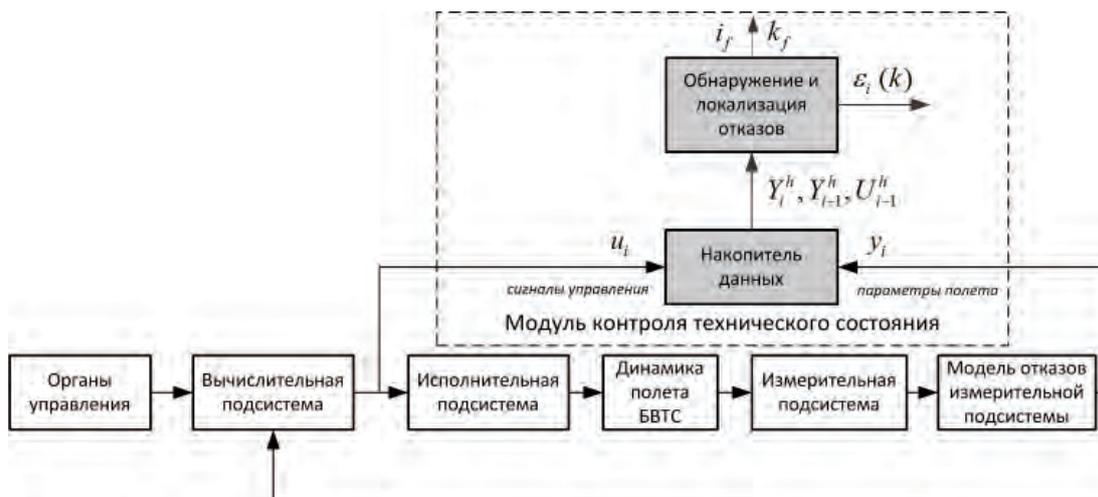


Рис. 2. Схема численного моделирования.

шающее 0.17 с. Возникновение оди-ночного отказа каждого датчика моделировалось на 0.4 с полета с коэффициентом отказа $f_k=0$ для сценариев отсутствия управления и управления по тангажу. Соответствующие графики, иллюстрирующие отказ некоторых датчиков, представлены на рис. 3–6.

Видно, что при отсутствии управления значения критерия близки к нулю и имеют стохастический характер для всех каналов измерений, что позволяет достоверно утверждать о работоспособности СУП. Все графики при возникновении отказов имеют форму с четко выраженными импульсами в отказавших каналах, что позволяет говорить о том, что задача обнаружения отказов датчиков решена. Таким образом, используя выражения можно решать задачу обнаружения отказов измерительной подсистемы БВТС с использованием безмодельного подхода.

Использование безмодельного подхода позволяет применять данный подход для различного класса БВТС, информация о математической модели которых неизвестна. Это ключевое преимущество рассматриваемого подхода перед другими подходами. Именно поэтому подход можно использовать для решения задачи обеспечения эксплуатационной безопасности БВТС в условиях модельных неопределенностей.

Методы обеспечения функциональной безопасности

Подсистема функциональной безопасности предназначена для предотвращения рисков, связанных со столкновениями БВТС. В этой связи сформулируем задачу следующим образом. Необходимо построить алгоритм прогнозирования параметров движения маневрирующего судна посадки БВТС при следующих ограничениях:

- входные сигналы системы управления судна посадки неизвестны (имеется только допущение, что сигналы линейны);
- модель динамики судна посадки неизвестна (имеется только допущение, что она линейна);
- внешние возмущения неизвестны;
- измеряются только координаты судна посадки.

Необходимо построить прогноз траектории движения судна посадки при условии, что управляющее воздействие изменяется во времени, но сам закон управления неизвестен.

В этой связи построение трендов изменения параметров не дает приемлемого результата, а отсутствие информации о входном воздействии не позволяет использовать подходы, основанные на моделях. Рассмотрим применение безмодельных подходов для решения этой задачи.

Пусть динамика судна посадки описывается линейной дискретной моделью

$$x_{i+1}^y = A_y x_i^y + B u_i, \tag{11}$$

$$y_i = C_y x_i^y, \tag{12}$$

где y_i – измеряемые пространственные координаты судна; x_i^y – неизвестный вектор состояния судна; A_y, B, C_y – неизвестные матрицы собственной динамики, эффективности управления и измерения судна; u_i – неизвестный вектор управления, формируемый в виде

$$x_{i+1}^u = A_u x_i^u, \tag{13}$$

$$u_i = C_u x_i^u, \tag{14}$$

где x_i^u – неизвестный вектор состояния системы управления; A_u, C_u – неизвестные матрицы собственной динамики и выхода системы управления (рис. 7).

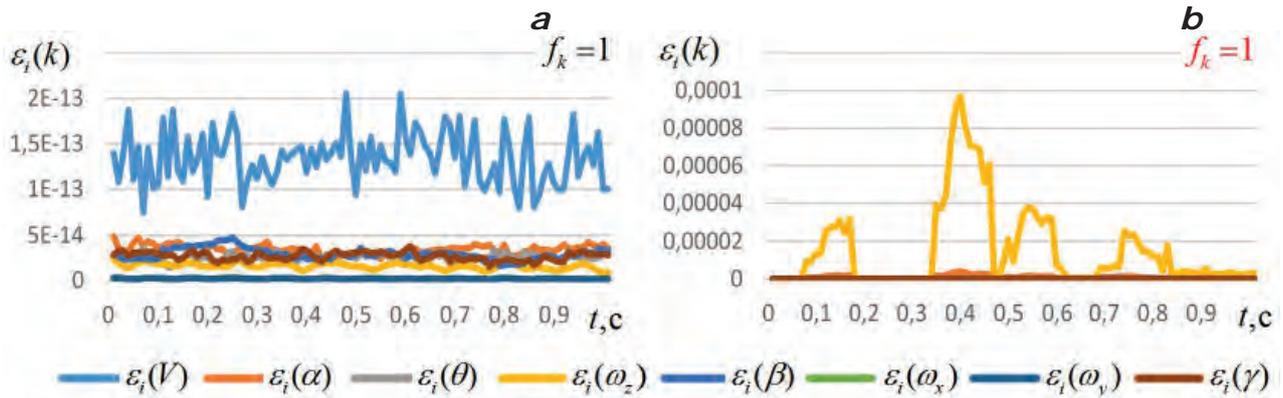


Рис. 3. Значения критерия при отсутствии отказов: а – при отсутствии управления, б – при управлении по тангажу.

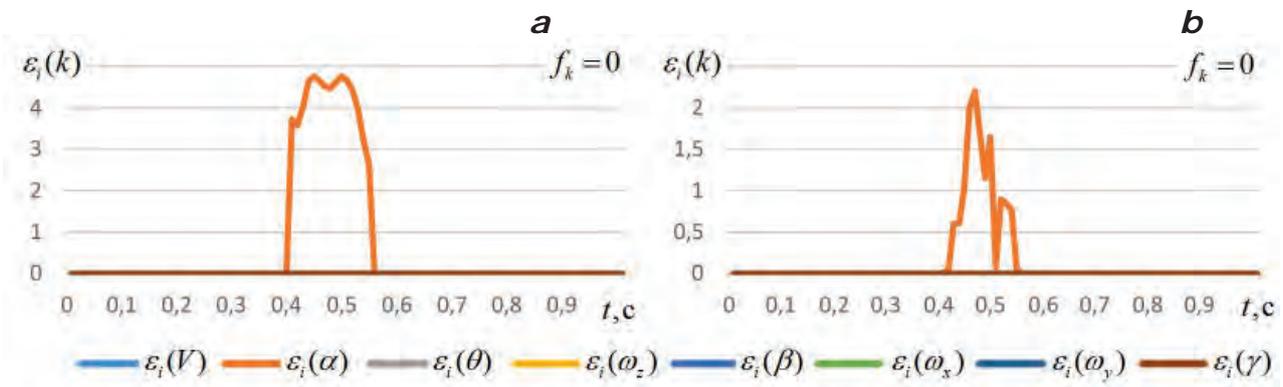


Рис. 4. Значения критерия при отказе датчика α: а – при отсутствии управления, б – при управлении по тангажу.

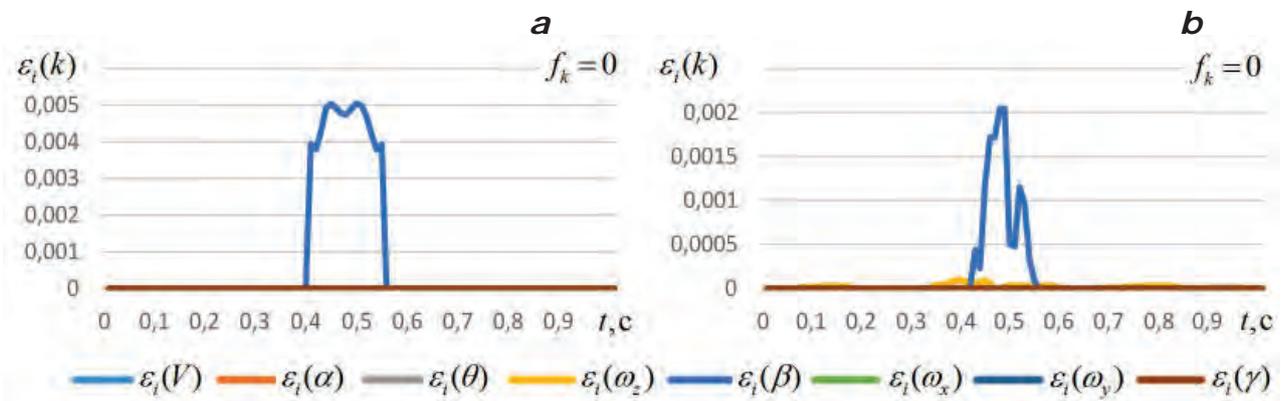


Рис. 5. Значения критерия при отказе датчика β: а – при отсутствии управления, б – при управлении по тангажу.

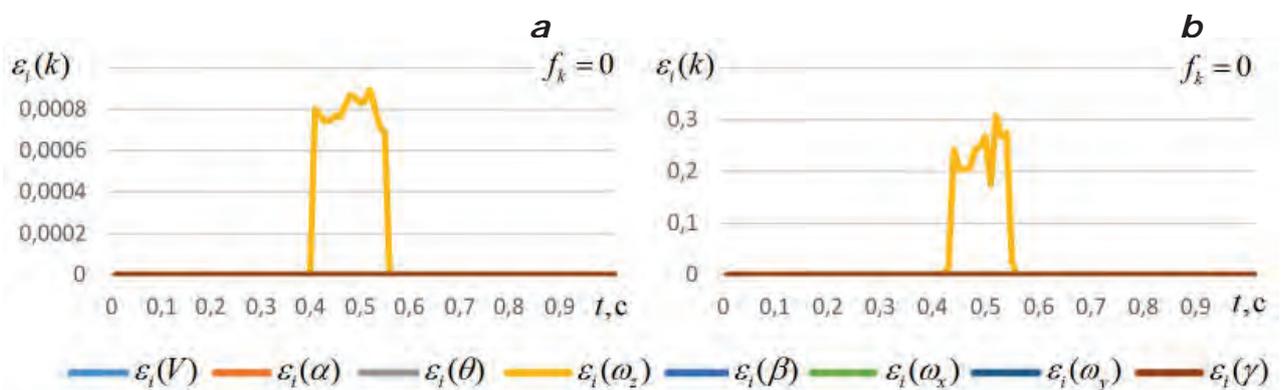


Рис. 6. Значения критерия при отказе датчика ω_z: а – при отсутствии управления, б – при управлении по тангажу.

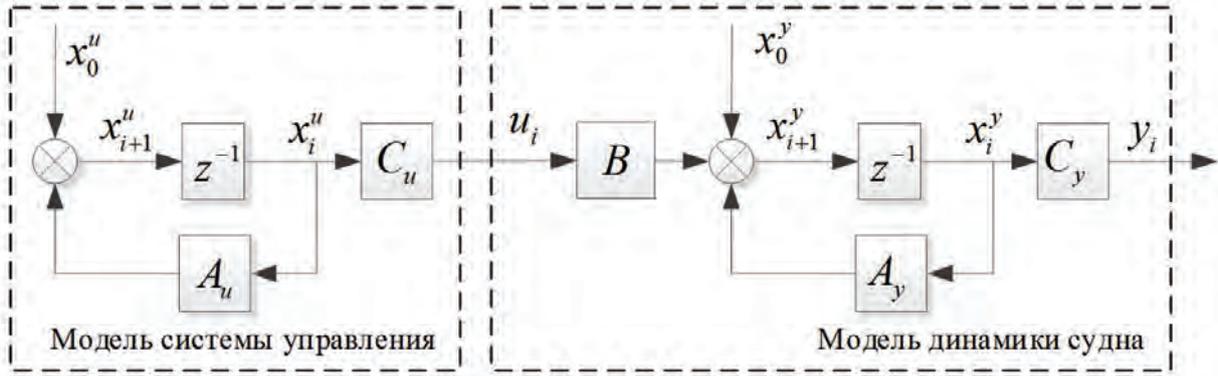


Рис. 7. Модель маневрирующего судна посадки.

Подставим (14) в (11)

$$x_{i+1}^y = A_y x_i^y + B C_u x_i^u, \quad (15)$$

объединим выражения (15) и (13), и запишем эквивалентную (11)–(14) модель с расширенным вектором состояния

$$x_{i+1} = A x_i, \quad (16)$$

$$y_i = C x_i, \quad (17)$$

где

$$x = \begin{bmatrix} x^y \\ x^u \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} A_y & B C_u \\ 0 & A_u \end{bmatrix}, C = [C_y \quad 0], \quad (18)$$

или в блочно-матричном виде

$$Y_{i+1}^{v,1} = A Y_i^{v,1}, \quad (19)$$

где v – индекс наблюдаемости,

$$Y_i^{v,1} = \begin{bmatrix} y_{i-v} \\ y_{i-v+1} \\ y_{i-v+2} \\ \vdots \\ y_i \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} \tilde{C}^L \\ \tilde{C}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} A \tilde{C}^L, C = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^v \end{bmatrix}.$$

Предположим, что наблюдение за судном посадки ведется на протяжении некоторого времени $h + 1$, тогда модель (19) примет вид

$$Y_{i+1}^{v,h} = A Y_i^{v,h}, \quad (20)$$

где

$$Y_{i+1}^{v,h} = \begin{bmatrix} Y_{i-h+1}^{v,1} & \dots & Y_i^{v,1} & Y_{i+1}^{v,1} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$Y_i^{v,h} = \begin{bmatrix} Y_{i-h}^{v,1} & \dots & Y_{i-1}^{v,1} & Y_i^{v,1} \end{bmatrix},$$

из которого можно записать линейное матричное уравнение идентификации параметров эквивалентной модели

$$A Y_i^{v,h} = Y_{i+1}^{v,h}. \quad (22)$$

Тогда для разрешимости уравнения (22) необходимо и достаточно обеспечить выполнение следующего условия:

$$Y_{i+1}^{v,h} \overline{Y_i^{v,h}}^R = 0, \quad (23)$$

где правый делитель нуля определяется из выражения

$$Y_i^{v,h} \overline{Y_i^{v,h}}^R = 0. \quad (24)$$

В итоге, после подстановки (21) в (23), прогнозирование вектора измерений осуществляется по формуле

$$\hat{y}_{i+1} = -Y_i^{1,h} R_{i-1} r_i^+, \quad (25)$$

где $Y_i^{1,h} = [y_{i-h} \dots y_{i-1} \quad y_i]$, r_i^+ – псевдообращение, а элементы делителя нуля определяются из условия (24)

$$Y_i^{v,h} \overline{Y_i^{v,h}}^R = \begin{bmatrix} Y_{i-1}^{v,h-1} & Y_i^{v,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ r_i \end{bmatrix} = 0. \quad (26)$$

Проверка работоспособности формулы (25) осуществлялась на полной нелинейной динамической модели судна посадки с вектором измерения $y = [x_e \ y_e \ z_e \ V_x \ V_y \ V_z \ \gamma \ \vartheta \ \psi \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z]$, x_e, y_e, z_e – пространственные координаты (м), V_x, V_y, V_z – линейные скорости (м/с), γ, ϑ, ψ – углы крена, тангажа, рысканья (град), $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – угловые скорости (град/с), $u = [u_1 \ u_2]^T$, u_1 – угол отклонения руля (град), u_2 – скорость вращения двигателя [14].

Для формирования матриц измерений на интервале наблюдения использовался накопитель информации. В блоке синтеза алгоритма прогнозирования реализованы формулы (25)–(26). Ширина окна наблюдения выбрана $h = 15$, индекс наблюдаемости $v = 4$. Сигналы управления имеют синусоидальный вид для угла отклонения руля и линейно нарастающий с ограничением по скорости для скорости вращения двигателя. Динамика элементов вектора состояния приведена на рис. 8.

Результаты численного моделирования показывают высокие характеристики точности и быстродействия решения задачи. Ошибки прогнозирования траектории движения судна не превышают четвертого десятичного знака по всем пространственным координатам (рис. 9). Ранг матрицы Ганкеля данных не превышает 7, поэтому настройка алгоритма с учетом индекса наблюдаемости происходит в течение 10 измерений, то есть с учетом шага дискретизации 0.05 с, всего за 0.5 с, при появлении зависимых столбцов, а, следовательно, и правого делителя нуля у матрицы данных вида (26).

Полученные результаты численного моделирования решения задачи прогнозирования траектории судна подтверждают работоспособность и очень быструю настройку

разработанного метода в условиях полной параметрической и непараметрической неопределенности.

Практическая реализация разрабатываемого безмодельного подхода позволит повысить точность прогнозирования и решить задачу обеспечения безопасности полетов БВТС в условиях городской застройки и учитывать особенности движения маневрирующих судов посадки.

Методы учета психофизиологического состояния оператора БВТС

Рассмотрим особенность учета психофизиологического состояния оператора БВТС с целью снижения

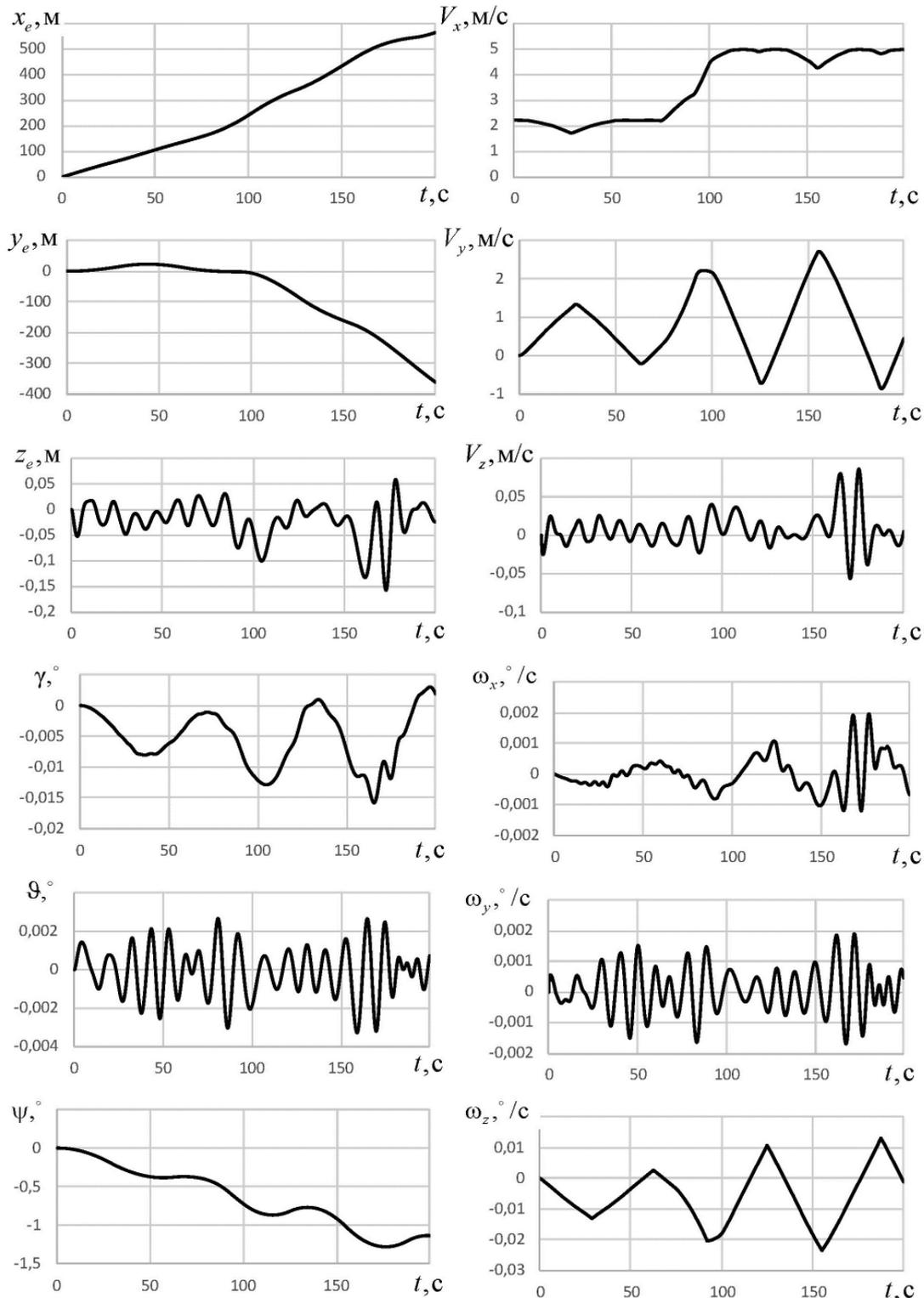


Рис. 8. Вектор состояния судна посадки.

количества ошибок, допускаемых операторами БВТС при распределении внимания оператора БВТС и допускаемых им при пилотировании ошибок. Актуальность задачи подтверждается количеством происшествий со сложными техническими средствами вследствие проблем восприятия и идентификации, распределения внимания и ситуационной осведомленности [18, 19].

Рассмотрим также задачу посадки БВТС на маневрирующую платформу. Причем в качестве платформы выберем судно, плывущее по реке в условиях города. Этот случай наиболее сложен, вследствие особенностей учета движения подвижной платформы. При такой постановке задачи пилот БВТС должен осуществ-

лять пилотирование с заданной скоростью и удерживать в поле зрения движущуюся платформу.

Рассмотрим несколько постановок задачи:

- 1) полет в простых метеоусловиях без отказа;
- 2) полет в сложных метеоусловиях;
- 3) полет с ограничением времени посадки;
- 4) полет с отказом;
- 5) полет в условиях утомления оператора БВТС.

Для оценки психофизиологического состояния оператора БВТС анализировались расширение зрачка человека и его глазодвигательная активность.

Изменения диаметра зрачка отражали постепенное нарастание нагрузки под влиянием усложняющих факторов и их сочетания на трех этапах полета:

- 1) полет к месту посадки;
- 2) поиск посадочной платформы в районе посадки и слежение за ней;
- 3) непосредственно сам этап посадки.

Вариативность диаметра зрачка на разных этапах полетного задания и в разных сериях эксперимента представлена на *рис. 10*.

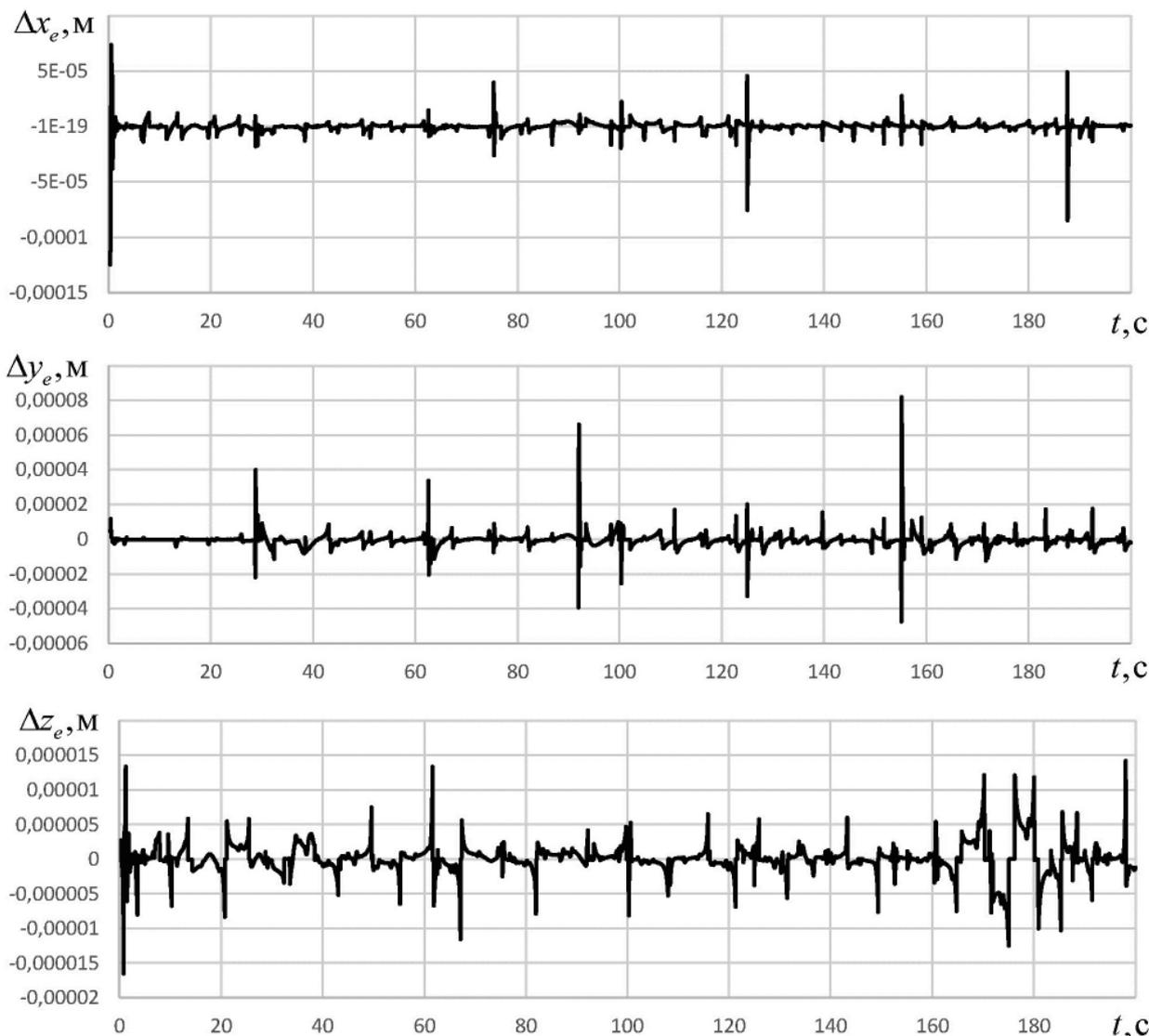


Рис. 9. Ошибки прогнозирования траектории движения судна посадки.

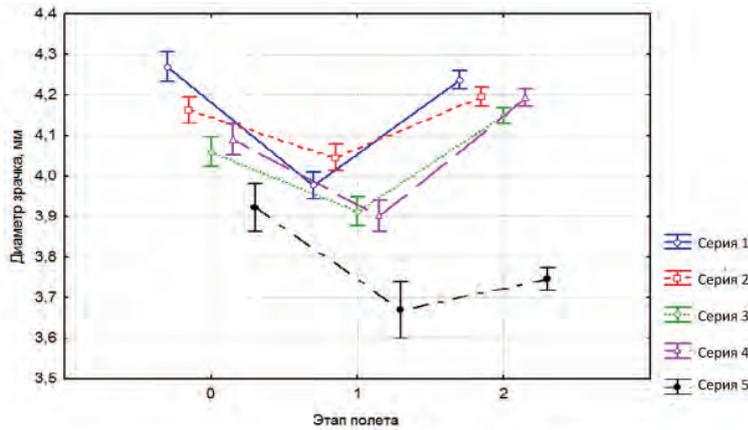


Рис. 10. Вариативность диаметра зрачка на разных этапах полетного задания и в разных сериях эксперимента.

Наименьший диаметр зрачка соответствует самой высокой когнитивной нагрузке. Это было зафиксировано при выполнении совместного поиска движущейся платформы и выдерживанием заданной скорости полета. Максимальный уровень нагрузки отмечается в пятой серии, выполняемой под влиянием утомления оператора.

Для детального исследования характера распределения внимания операторов в процессе выполнения полетного за-

дания был проведен анализ результатов показателей оculoмоторной активности. Зависимость амплитуд саккад от длительности фиксаций приведен на рис. 11.

При усложнении условий полета значительно снижается средняя длительность фиксации и возрастает амплитуда саккад (рис. 12).

Длительность фиксаций подчиняется полимодальному распределению с выделением кластеров ультракоротких компенсирующих фиксаций (<90 мс); коротких амбиентных 90–140 мс; предфокальных 140–200 мс; фокальных 200–350 мс и экстрадлинных фиксаций. Фокальные фиксации ассоциированы с более высокой эффективностью совмещенной деятельности: успешным поиском и идентификацией цели, корректным считыванием и выдерживанием показаний скорости. Совмещенная деятельность со-

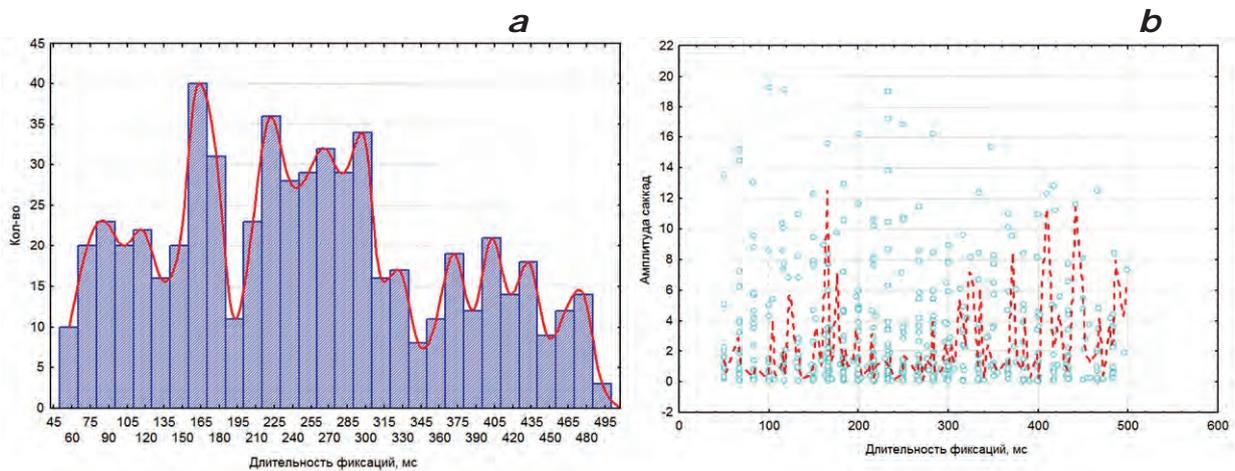


Рис. 11. Длительность фиксаций (а) и зависимость амплитуды саккад от длительности фиксаций (б).

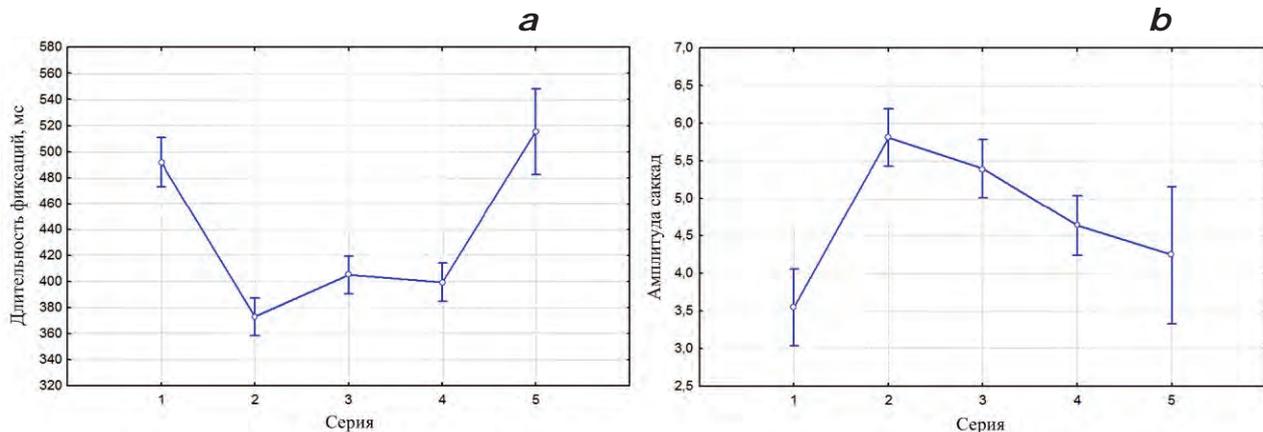


Рис. 12. Средняя длительность фиксаций (а) и амплитуда саккад (б).

проводилась ожидаемым эффектом туннелирования – в сложных условиях совмещенные задачи становятся конкурирующими, приоритет приобретает поиск цели, что отражается в увеличении длительности фиксации в соответствующей области интерфейса за счет уменьшения длительности фиксации в других зонах.

Результаты моделирования также показали, что операторы сосредотачивали внимание на задаче поиска и опознания подвижной платформы в ущерб контролю скорости полета, что приводило к ошибкам пилотирования (в 29% случаев) и ее отклонениям от заданных значений (в 36% случаев).

По данным регистрации окуломоторной активности операторов установлено, что при выполнении совмещенной деятельности взор операторов сосредотачивался на зоне для обзора посадочной площадки. Такое сосредоточение сопровождалось ростом длительности зрительных фиксаций этой зоны за счет сокращения длительности фиксаций в пространственно удаленной зоне интерфейса, в которой индцировался указатель скорости.

Показано, что в процессе выполнения совмещенной деятельности с воссозданием усложненных условий выполнения полетного задания (ухудшение метеоусловий, отказ) возрастает операциональное психическое напряжение операторов (индексы Р.М. Баевского), развивается зрительное утомление. Вследствие этого значительно возрастает когнитивная нагрузка операторов. Подобная ситуация создает предпосылки для проявлений психологических (когнитивных) уязвимостей.

Подводя итог отметим: на основании подходов, основанных на анализе

расширения зрачка человека и его глазодвигательной активности, можно разработать методы определения ухудшения работоспособности оператора БВТС.

Заключение

Для обеспечения безопасности полетов БВТС предложено использовать интегрированную систему обеспечения безопасности полетов БВТС. Эта система должна включать методы обеспечения эксплуатационной безопасности, регистрирующей техническое состояние и отказы бортового оборудования; методы обеспечения функциональной безопасности, направленные на устранение рисков, связанных со столкновениями; методы учета психофизиологического состояния оператора БВТС с целью снижения количества ошибок, допускаемых операторами БВТС при распределении внимания и допускаемых ими при пилотировании ошибок.

Объединение всех задач в единый комплекс позволит сократить общее количество обрабатываемой информации за счет использования общих информационных моделей, повысить осведомленность оператора БВТС о летной ситуации, достоверность используемой для принятия решения информации, ранжировать опасные признаки по уровням критичности и построить систему поддержки принятия решений, учитывающую взаимосвязь как внешней обстановки, так и технического состояния БВТС.

Разработанные методы и алгоритмы составят основу систем контроля безопасности и предотвращения опасных полетных ситуаций, позволяющую проводить оценку особых ситуаций полета, построение карты уровней угроз, и на ее основе формировать наиболее предпочтительное управление БВТС, удовлетворяющее требованиям безопасности полетов с использованием всех доступных способов прогнозирующего контроля с учетом динамики полета и технического состояния БВТС.

Научная значимость полученных результатов состоит в том, что развиваемые в рамках безмодельных методов алгоритмы диагностики и прогнозирования не требуют априорной информации о модели динамики полета БВТС. Независимость от модели БВТС разрабатываемых методов обнаружения, локализации неисправностей и прогнозирования параметров его движения позволяет существенно повысить достоверность и точность получаемых решений за счет исключения ошибок, связанных с модельными неопределенностями.

Литература

1. K. AL-Dosari, N. Fetasi
Safety, 2023, 9(3), 64. DOI: 10.3390/safety9030064.
2. S.A.H. Mohsan, N.Q.H. Othman, Y. Li, M.H. Alsharif,
M.A. Khan
Intell. Serv. Robot., 2023, 16, 109. DOI: 10.1007/s11370-022-00452-4.
3. N. Abbas, Z. Abbas, X. Liu, S.S. Khan, E.D. Foster, S. Larkin
Appl. Sci., 2023, 13(17), 9881. DOI: 10.3390/app13179881.
4. N. Thakur, P. Nagrath, R. Jain, D. Saini, N. Sharma,
D.J. Hemanth
B Machine Intelligence and Data Analytics for Sustainable Future Smart Cities. Studies in Computational Intelligence, Vol. 971, Eds U. Ghosh, Y. Maleh, M. Alazab, Al-S. K. Pathan, FRG, Cham, Springer, 2021, pp. 329–333. DOI: 10.1007/978-3-030-72065-0_18.

5. **J. Vodák, D. Šulyová, M. Kubina**
Sustainability, 2021, **13**(10), 5746.
DOI: 10.3390/su13105746.
6. **R. Jain, P. Nagrath, N. Thakur, D. Saini, N. Sharma, D.J. Hemanth**
B Development and Future of Internet of Drones (IoD): Insights, Trends and Road Ahead, SSDC, Vol. 332, Eds R. Krishnamurthi, A. Nayyar, A. E. Hassanien, FRG, Cham, Springer, 2021, 109–140. DOI: 10.1007/978-3-030-63339-4_4.
7. **N. Mohamed, J. Al-Jaroodi, I. Jawhar, A. Idries, F. Mohammed**
Technol. Forecast. Soc. Change, 2020, **153**, 119293.
DOI:10.1016/j.techfore.2018.05.004.
8. **D. Gettinger**
Public Safety Drones, 3rd Edn, USA, MN, Annandale, Center for the Study of the Drone, Bard College, 2020.
9. **Drones in Smart-Cities: Security and Performance**, Ed. Fadi Al-Turjman, Elsevier, 2020, 238 pp.
DOI: 10.1016/C2019-0-00992-2.
10. **M.A. Khan, B.A. Alvi, E.A. Safi, I.U. Khan**
B Proc. The 28th Int. Conf. on Electrical, Electronics, Computers, Communication, Mechanical and Computing (IN, Tamil Nadu, 28–29 January, 2018), IN, Tamil Nadu, 2018, pp. 1–6.
11. **A. Ataei, I.C. Paschalidis**
B Proc. The 54th IEEE Conf. Decision and Control (JP, Osaka, 15–18 December, 2015), JP, Osaka, IEEE, 2015, pp. 5130–5135.
DOI: 10.1109/CDC.2015.7403022.
12. **M. Polka, S. Ptak, L. Kuziora, A. Kuczynska**
B Drones – Applications, Ed. G. Dekoulis, UK, London, IntechOpen, 2018, pp. 83–96.
DOI: 10.5772/intechopen.73320.
13. **A. Nayyar, B.L. Nguyen, N.G. Nguyen**
B Proc. The 1st Int. Conf. Sustainable Technologies for Computational Intelligence. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 1045, IN, Rajasthan, Jaipur, 29–30 March, 2019), SG, Singapore, Springer, 2020, pp. 563–580.
DOI: 10.1007/978-981-15-0029-9_45.
14. **В.В. Косьянчук, Е.Ю. Зыбин, В.В. Глазов, Л. Тань**
Мехатроника, автоматизация, управление, 2021, **22**(12), 660.
DOI: 10.17587/mau.22.660-670.
15. **Ju.V. Bondarenko, E.Yu. Zybin**
Civil Aviation High Technologies, 2020, **23**(3), 39.
DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-3-39-51.
16. **Yu. Bondarenko, A. Chekin, E. Zybin, V. Kosyanchuk**
IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng., 2020, **714**(1), 012004.
DOI: 10.1088/1757-899X/714/1/012004.
17. **E. Zybin, V. Kosyanchuk, S. Karpenko**
MATEC Web of Conferences, 2017, 03011.
DOI: 10.1051/mateconf/20179903011.
18. **A.Yu. Akimova, A.A. Oboznov**
Psychology in Russia: State of the Art, 2022, **15**(1), 20.
DOI: 10.11621/pir.2022.0102.
19. **В.В. Косьянчук, Ю.В. Бессонова, А.А. Обознов, А.Н. Занковский, И.И. Грешиников, И.А. Махортов**
Институт психологии Российской академии наук. Организационная психология и психология труда, 2022, **7**(4), 227. DOI: 10.38098/ipran.opwp_2022_25_4_010.

English

Integrated Flight Safety System for Unmanned Aerial Vehicles in a Single “Smart City” Sky*

Vladislav V. Kosyanchuk

Professor,
State Research Institute of Aviation Systems
7 Victorenko Str., Moscow, 125167, Russia
vvk@gosniias.ru

Alexander A. Oboznov

Professor,
Institute of Psychology, RAS
13–1 Yaroslavskaya Str., Moscow, 129366, Russia
aao46@mail.ru

Eugene Yu. Zybin

State Research Institute of Aviation Systems
7 Victorenko Str., Moscow, 125167, Russia
zybin@gosniias.ru

Yulia V. Bessonova

Institute of Psychology, RAS
13–1 Yaroslavskaya Str., Moscow, 129366, Russia
bessonovajv@ipran.ru

Abstract

The paper discusses the concept of building an integrated flight safety system for unmanned aerial vehicles (UAVs) in a single smart city sky, including the designing of the operational safety methods, minimizing the risks associated with equipment failures; functional safety methods, eliminating the risks associated with collisions; psychophysiological safety methods, taking into account the control of the vehicle based on the characteristics of the human operator. The methods of operational and functional safety are based on a unified approach for model-free processing of information on the input and output signals of the UAV’s flight control system. The realization of this approach will allow, first of all, scaling flight safety systems to different classes of aircrafts without the need to create complex mathematical models of each object separately.

Keywords: operational safety, functional safety, psychophysiological safety, unmanned aerial vehicles, smart city.

*The work was financially supported by RFBR (project 19-29-06091).

Images & Tables ●



Fig. 1. Black box problem.

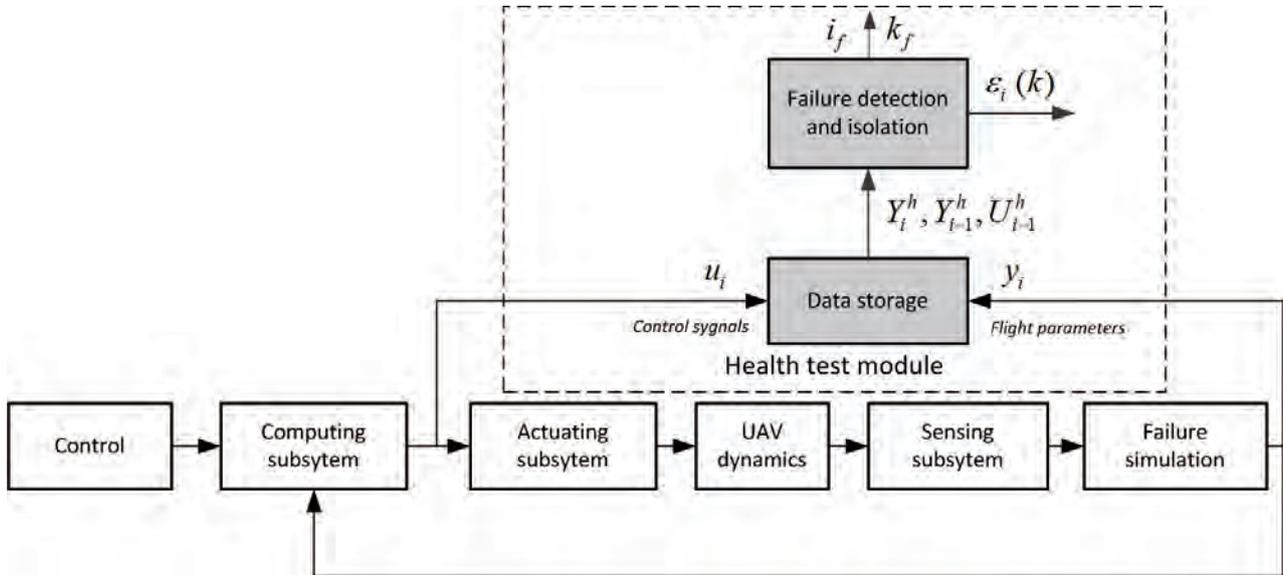


Fig. 2. Numerical simulation scheme.

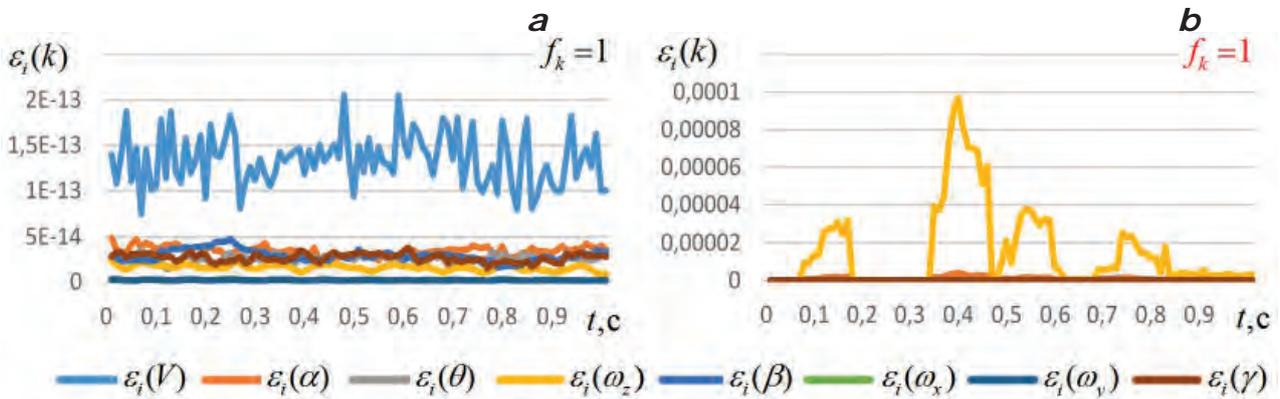


Fig. 3. Values of criterion (10) in the absence of failures: a – absence of control, b – pitch control.

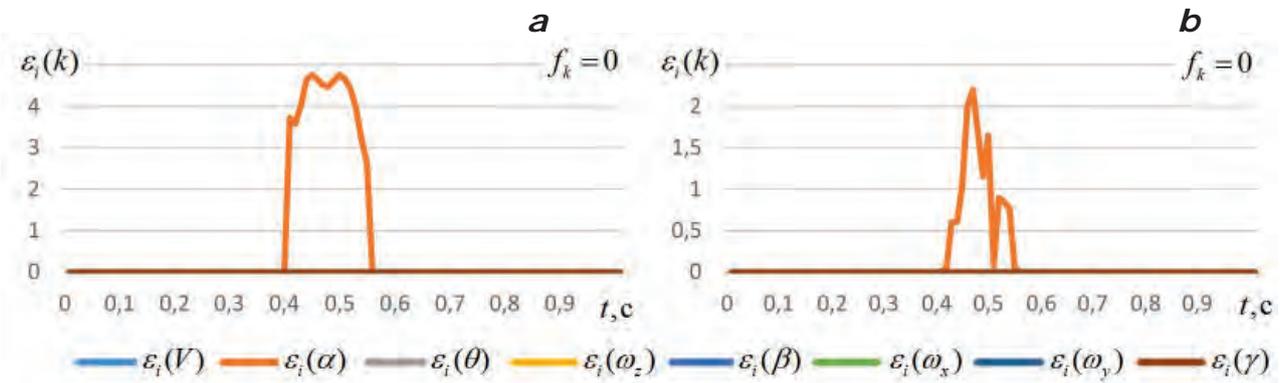


Fig. 4. Values of criterion (10) in case of α sensor failure: a – absence of control, b – pitch control.

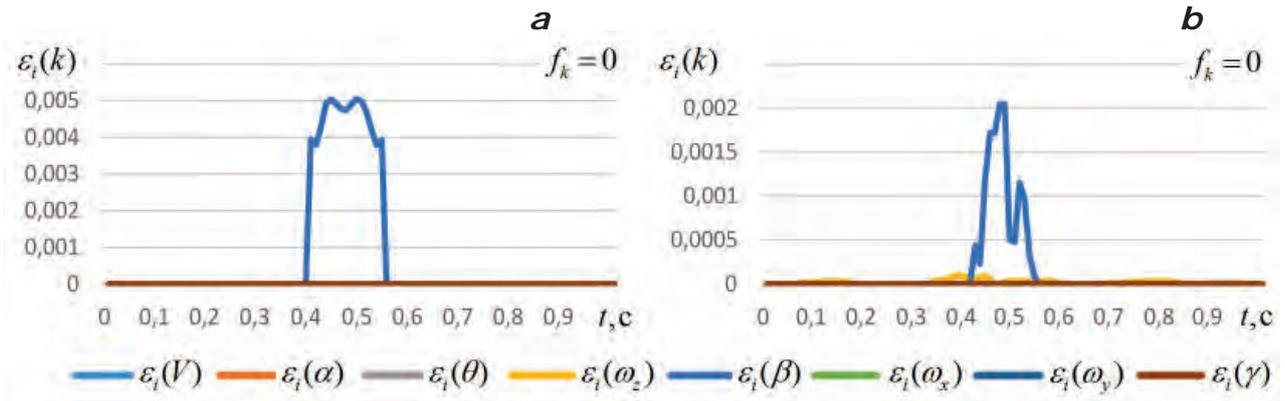


Fig. 5. Values of criterion (10) in case of β sensor failure: a – absence of control, b – pitch control.

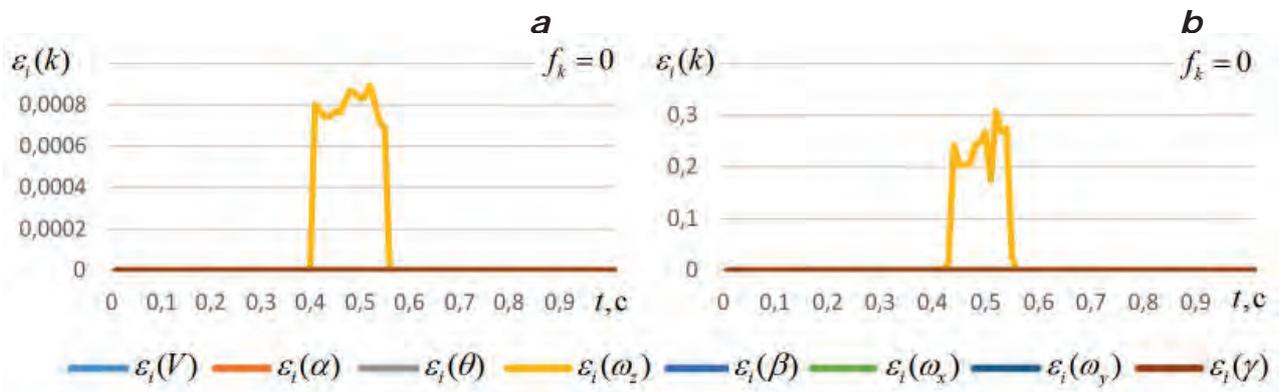


Fig. 6. Values of criterion (10) in case of ω_z sensor failure: a – absence of control, b – pitch control.

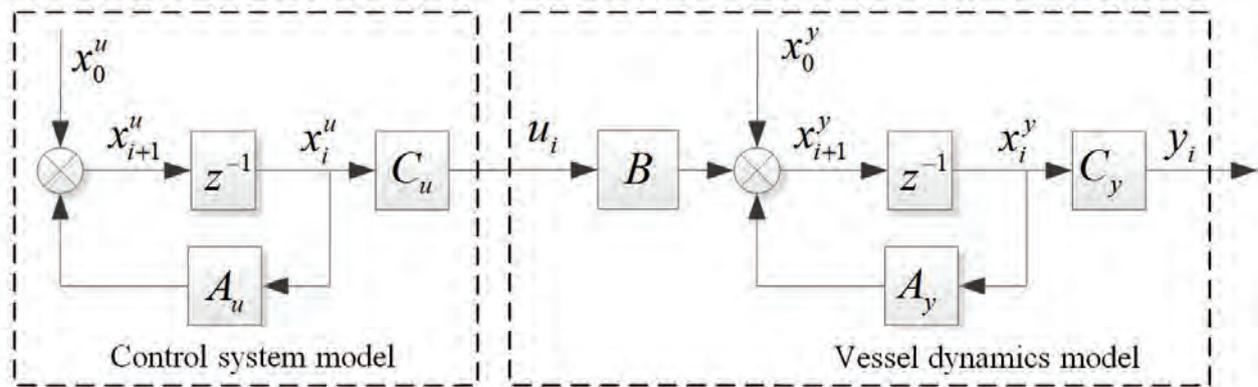


Fig. 7. The model of a maneuvering vessel.

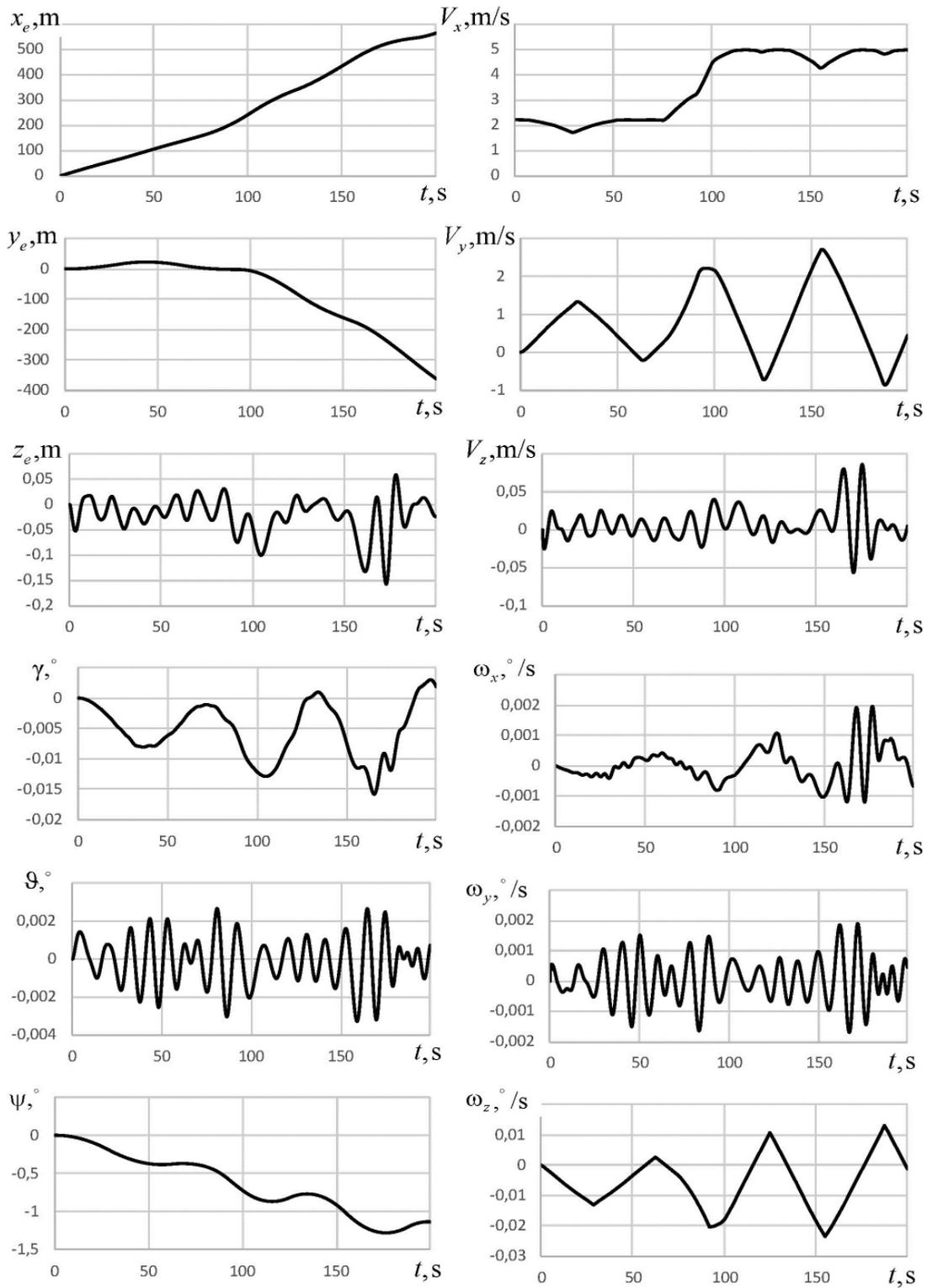


Fig. 8. Vessel state vector.

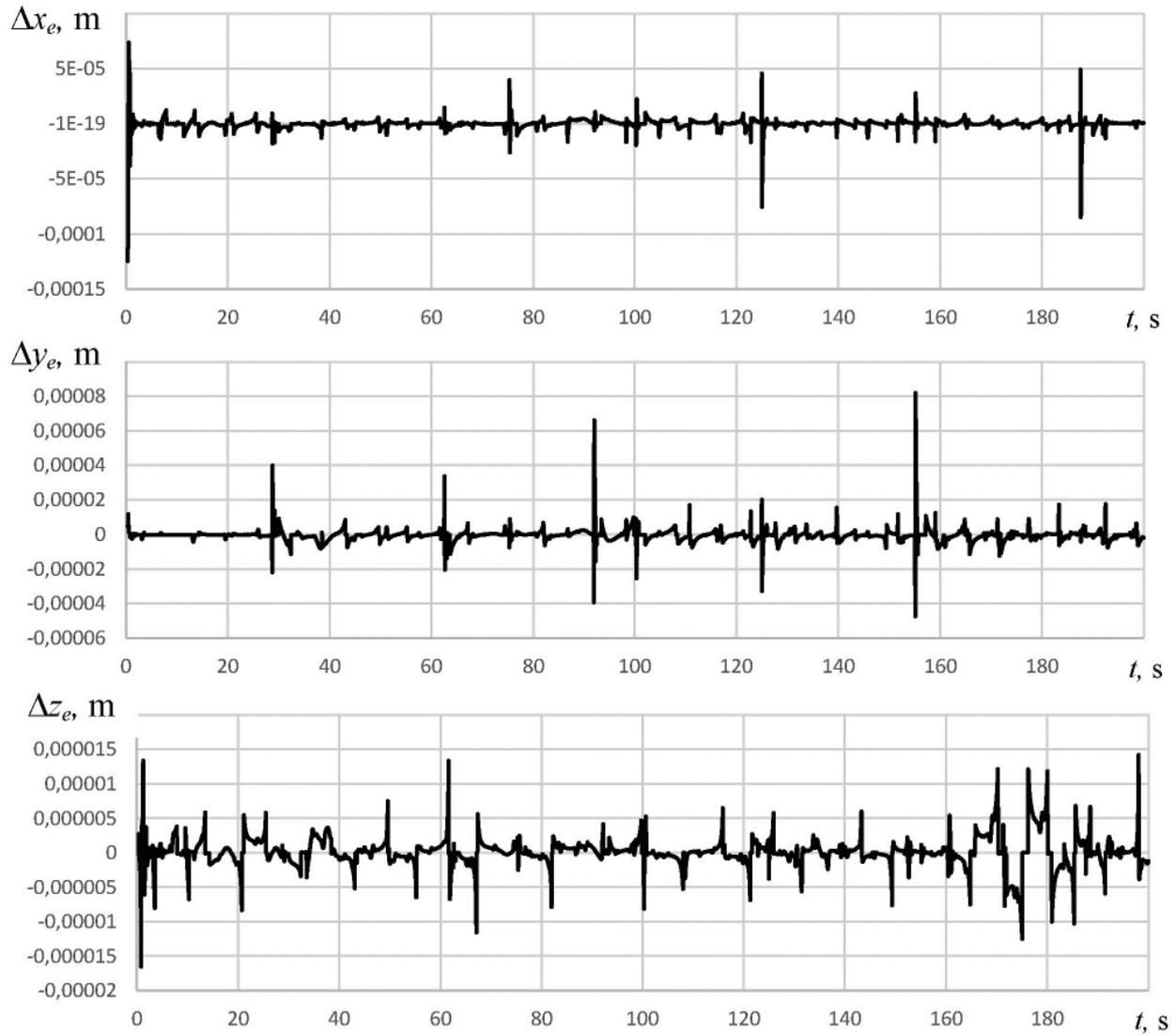


Fig. 9. Errors in predicting the trajectory of the vessel.

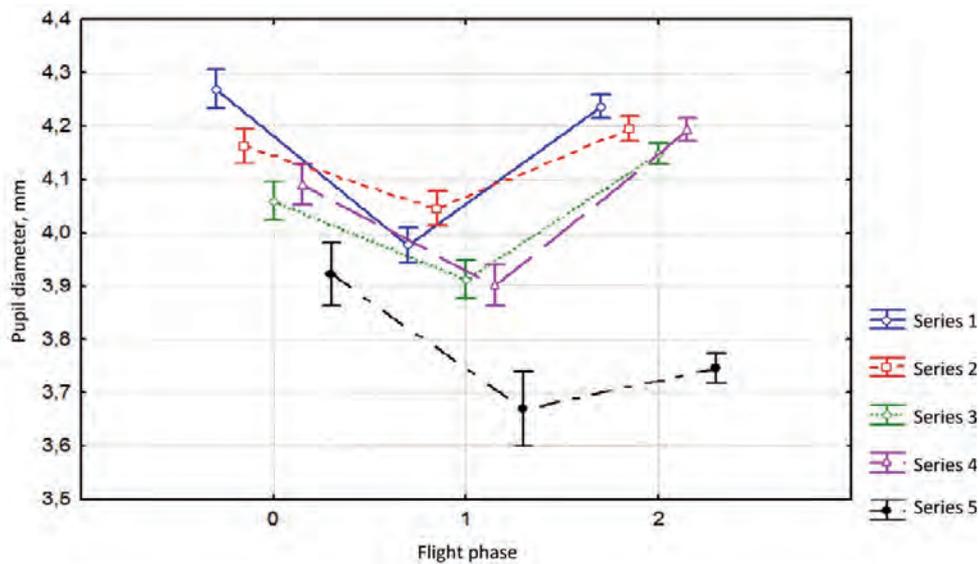


Fig. 10. Variability of human pupil diameter at different stages of the flight phase and in different experimental series.

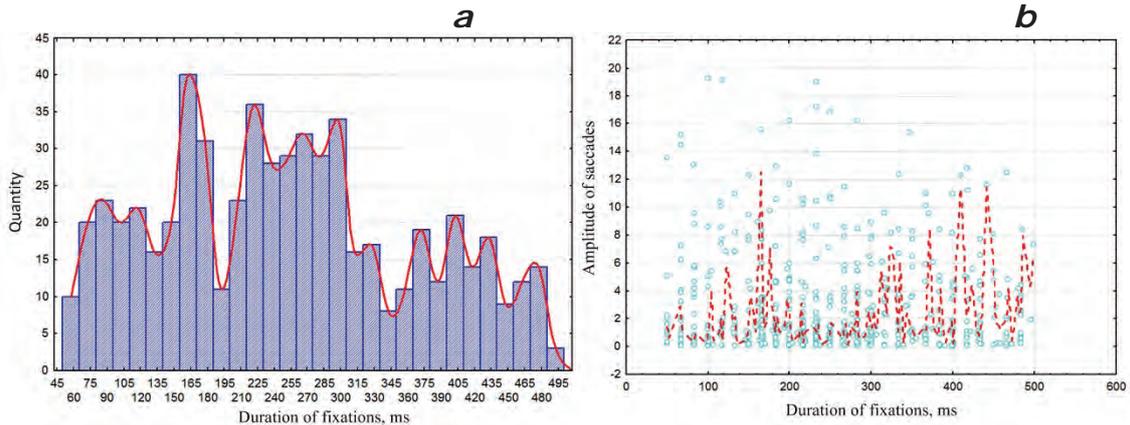


Fig. 11. Duration of fixations (a) and dependence of the amplitude of saccades on the duration of fixations (b).

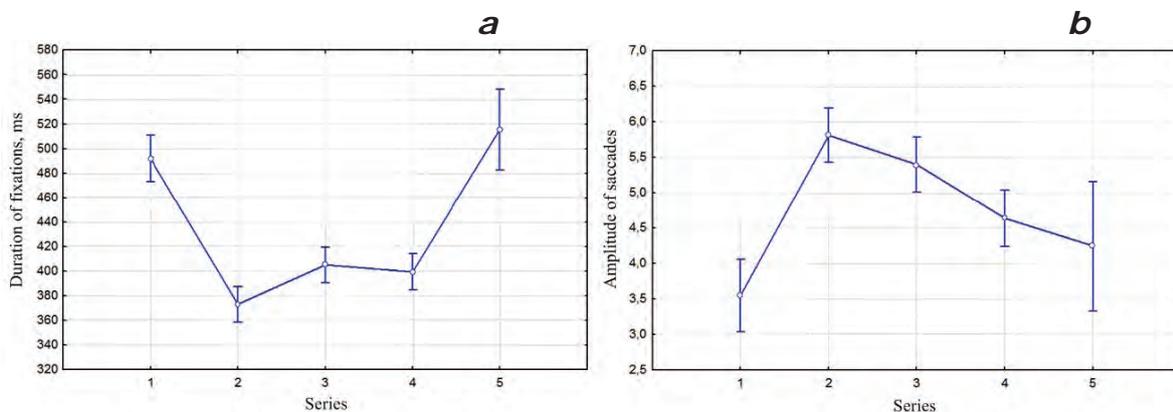


Fig. 12. Average duration of fixations (a) and amplitude of saccades (b).

References

1. K. AL-Dosari, N. Fetais
Safety, 2023, 9(3), 64. DOI: 10.3390/safety9030064.
2. S.A.H. Mohsan, N.Q.H. Othman, Y. Li, M.H. Alsharif, M.A. Khan
Intell. Serv. Robot., 2023, 16, 109. DOI: 10.1007/s11370-022-00452-4.
3. N. Abbas, Z. Abbas, X. Liu, S.S. Khan, E.D. Foster, S. Larkin
Appl. Sci., 2023, 13(17), 9881. DOI: 10.3390/app13179881.
4. N. Thakur, P. Nagrath, R. Jain, D. Saini, N. Sharma, D.J. Hemanth
In *Machine Intelligence and Data Analytics for Sustainable Future Smart Cities. Studies in Computational Intelligence*, Vol. 971, Eds U. Ghosh, Y. Maleh, M. Alazab, Al-S. K. Pathan, FRG, Cham, Springer, 2021, pp. 329–333. DOI: 10.1007/978-3-030-72065-0_18.
5. J. Vodák, D. Šulyová, M. Kubina
Sustainability, 2021, 13(10), 5746. DOI: 10.3390/su13105746.
6. R. Jain, P. Nagrath, N. Thakur, D. Saini, N. Sharma, D.J. Hemanth
In *Development and Future of Internet of Drones (IoD): Insights, Trends and Road Ahead*, SSDC, Vol. 332, Eds R. Krishnamurthi, A. Nayyar, A. E. Hassani, FRG, Cham, Springer, 2021, 109–140. DOI: 10.1007/978-3-030-63339-4_4.
7. N. Mohamed, J. Al-Jaroodi, I. Jawhar, A. Idries, F. Mohammed
Technol. Forecast. Soc. Change, 2020, 153, 119293. DOI: 10.1016/j.techfore.2018.05.004.
8. D. Gettinger
Public Safety Drones, 3rd Edn, USA, MN, Annandale, Center for the Study of the Drone, Bard College, 2020.
9. *Drones in Smart-Cities: Security and Performance*, Ed. Fadi Al-Turjman, Elsevier, 2020, 238 pp. DOI: 10.1016/C2019-0-00992-2.
10. M.A. Khan, B.A. Alvi, E.A. Safi, I.U. Khan
In *Proc. The 28th Int. Conf. on Electrical, Electronics, Computers, Communication, Mechanical and Computing (IN, Tamil Nadu, 28–29 January, 2018)*, IN, Tamil Nadu, 2018, pp. 1–6.
11. A. Ataei, I.C. Paschalidis
In *Proc. The 54th IEEE Conf. Decision and Control (JP, Osaka, 15–18 December, 2015)*, JP, Osaka, IEEE, 2015, pp. 5130–5135. DOI: 10.1109/CDC.2015.7403022.
12. M. Polka, S. Ptak, L. Kuziora, A. Kuczynska
In *Drones – Applications*, Ed. G. Dekoulis, UK, London, IntechOpen, 2018, pp. 83–96. DOI: 10.5772/intechopen.73320.
13. A. Nayyar, B.L. Nguyen, N.G. Nguyen
In *Proc. The 1st Int. Conf. Sustainable Technologies for Computational Intelligence. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 1045, IN, Rajasthan, Jaipur, 29–30 March, 2019, SG, Singapore, Springer, 2020, pp. 563–580. DOI: 10.1007/978-981-15-0029-9_45.
14. V.V. Kosyanchuk, E.Yu. Zybin, V.V. Glasov, L. Tan
Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie [J. Mechatronics, Automation, Control], 2021, 22(12), 660 (in Russian). DOI: 10.17587/mau.22.660-670.
15. Ju.V. Bondarenko, E.Yu. Zybin
Civil Aviation High Technologies, 2020, 23(3), 39. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-3-39-51.
16. Yu. Bondarenko, A. Chekin, E. Zybin, V. Kosyanchuk
IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng., 2020, 714(1), 012004. DOI: 10.1088/1757-899X/714/1/012004.
17. E. Zybin, V. Kosyanchuk, S. Karpenko
MATEC Web of Conferences, 2017, 03011. DOI: 10.1051/mateconf/20179903011.
18. A.Yu. Akimova, A.A. Oboznov
Psychology in Russia: State of the Art, 2022, 15(1), 20. DOI: 10.11621/pir.2022.0102.
19. V.V. Kosyanchuk, Yu.V. Bessonova, A.A. Oboznov, A.N. Zankovskiy, I.I. Greshnikov, I.A. Mahortov
Scientific e-JOURNAL Institute of Psychology Russian Academy of Sciences. Organizational Psychology and Labor Psychology [IPRAN. Organizatsionnaya psikhologiya i psikhologiya truda], 2022, 7(4), 227 (in Russian). DOI: 10.38098/ipran.opwp_2022_25_4_010.

Разработка системы автономной навигации беспилотных транспортных средств с помощью ультразвуковых локационных методов*

О.В. Руденко, А.С. Шуруп

Приведены результаты работ по акустическим локационным методам применительно к небольшим летательным аппаратам. Разработана экспериментальная модель с оригинальной системой обнаружения и идентификации препятствий, учитывающей особенности дифракции и отражения акустических волн. Развита методика активной локации, использующие тройную корреляцию и свойства корреляционной функции ЛЧМ-сигналов, отраженных от вращающегося винта. Создан прототип мобильного содара, реализующий новые способы активной локации. Разработаны методы расчета дифрагированного акустического поля, основанные на обобщении интеграла Зоммерфельда и метода перевала, а также использующие асимптотические формулы для двумерного интеграла Фурье. Изучено акустическое переходное излучение. Установлены новые спектральные признаки сигналов, отраженных от движущегося летательного аппарата, с учетом взаимодействия собственного излучения и зондирующего сигнала на нелинейности подвижной границы.

Ключевые слова: акустическая локация, канонические задачи дифракции, акустическое переходное излучение, эффект Доплера.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-29-06048).

Введение

Беспилотные летательные аппараты, в том числе транспортные (БТС), находят широкое применение для обеспечения жизнедеятельности. Появление дешевых моделей БТС привело к взрывному росту их использования при создании «умных городов». Требуется решить комплекс задач, связанных с использованием БТС для доставки грузов в пределах города и прилегающих территорий. Для безопасного перемещения БТС нужна система, предупреждающая столкновения с препятствиями. В ее основе лежит задача оперативного сопоставления карты местности и положения БТС на этой карте. В англоязычной литературе эта задача известна как Simultaneous localization and mapping (SLAM) [1].

Среди методов локализации БТС можно выделить радиолокационные, оптические и акустические [2]. Преимуществом акустических методов является их низкая стоимость [3] и достаточно высокая точность обнаружения. Эффективное сечение рассеяния электромагнитных волн неметаллическими аппаратами обычно мало, и акустические волны могут дать больше информации. Кроме того, звук слабо затухает в тумане и оптически мутных средах. К недостаткам акустических методов можно отнести небольшую дальность обнаружения в ультразвуковом диапазоне (как правило, до нескольких сотен метров), которая определяется затуханием, дифракцией, высокими уровнями шумов в исходных данных и чувствитель-

ностью к вариациям характеристик среды. Развитие акустических методов локации БТС является перспективным направлением [4]. В настоящей работе кратко описаны оригинальные методы ориентации БТС в городской среде с использованием акустических датчиков, новые подходы к выделению признаков БТС с винтом (как в эхо-сигналах, так и в собственном излучении). В основе приложений лежат результаты фундаментальных исследований в теории дифракции (на конусах и клиньях), переходного излучения, взаимодействия волн в пластинах и в воздухе, численных методов.

Излучение и отражение волн при учете подвижности границ

Известно, что при движении источника и/или приемника возникает доплеровский сдвиг частоты. Для акустического сигнала относительный сдвиг $\Delta\omega/\omega \sim u/c$ (ω – частота излу-



РУДЕНКО
Олег Владимирович
академик,
Московский
государственный
университет
им. М.В. Ломоносова



ШУРУП
Андрей Сергеевич
Московский государственный
университет
им. М.В. Ломоносова

ния, u – скорость перемещения объекта, c – скорость акустической волны) на пять порядков превышает сдвиг для электромагнитного сигнала, поскольку скорость звука во столько же раз меньше скорости света. Однако расчет формы и спектра сигнала при произвольном движении объекта – это трудная задача. Продвинуться удалось на основе общего подхода к анализу формирования сигналов движущимся объектом как к задаче об излучении и отражении волн при учете подвижности границ [5]. Сформулировано функциональное уравнение, определяющее модуляцию отраженного сигнала при известном движении источника. Удалось найти явное выражение для отраженного сигнала. Интересно, что характер его модуляции напоминает искажение нелинейной римановой волны. Это означает, что происходит значительная трансформация и уширение спектра по сравнению с отражением от неподвижного объекта. В простейшем случае, если объект совершает колебания с частотой Ω и сам облучается акустической волной на частоте ω_0 , в спектре отраженного сигнала появляются гармоники:

$$\frac{(1-u/c)\omega_0 \pm n\Omega}{1+u/c}, n=0, 1, 2, 3, \dots$$

Их амплитуды выражаются через функции Бесселя [5]. Они могут служить спектральным признаком для локации движущегося летательного аппарата и оценки его характеристик.

Подход позволил сформулировать обратную задачу нахождения закона движения источника по измеренному отраженному сигналу. Установлен закон перемещения рассеивателя, при котором отраженная волна отсутствует. Были рассмотрены движение источника с постоянным ускорением и его колебательный режим, а также облучение гармоническим сигналом и импульсом. В ряде случаев обратную задачу удалось решить аналитически [5], например, восстановить закон перемещения объекта по форме профиля зондирующей и отраженной волн.

Акустическое переходное излучение

При движении летательного аппарата в городской среде возможно наблюдение новых эффектов, среди которых следует выделить переходное излучение (ПИ). В электродинамике такое излучение возникает при пересечении зарядом границы раздела двух сред с разными показателями преломления [6]. Когда частица переходит из одной среды в другую, окружающее ее поле изменяется, порождая волну. В акустике ПИ изучено в меньшей степени и обсуждается реже, чем в оптике. Однако акустический эффект гораздо сильнее оптического. Его наблюдал (слышал) каждый пассажир поезда, движущегося по мосту с периодически расположенными фермами, или при поездке в автомобиле мимо череды колонн или других конструкций, создающих сильные неоднородности границ. Некоторые аналогии ПИ в акустике и электродинамике указаны в обзоре [7]. Полный расчет характеристик направленности и спектров акустического ПИ довольно сложен. В рамках настоящей работы для анализа основных закономерностей рассматривалось движение летательного аппарата мимо близко расположенного здания в условиях плотной городской застройки. Важно, что акустическое ПИ, в отличие от оптики, может иметь не только дипольный, но и монополюсный характер [5] (рис. 1). Такой вид излучения возникает при пересечении летательным аппаратом границ зданий, иных неоднородностей границ, при движении экранопланов над неровной поверхностью, при переходе из одной среды в другую, отличающуюся значениями плотности и скорости звука. Полученные результаты формируют основу для более детального анализа акустического ПИ при решении задач акустической локации движущихся летательных аппаратов.

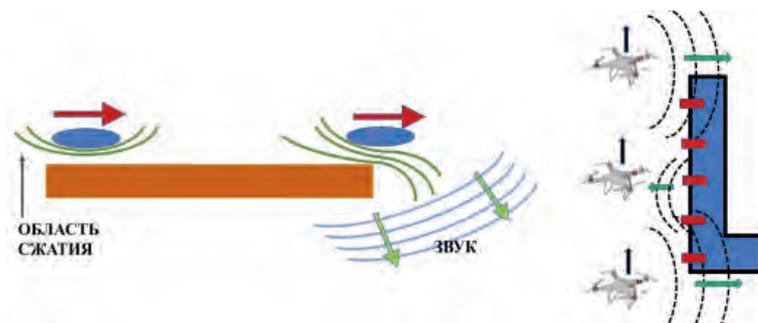


Рис. 1. Схема монополюсного и дипольного переходных излучений.

Прототип летательного аппарата с акустическим позиционированием

Одной из основных целей исследования было создание системы ориентации БТС, основанной на принципах акустической локации. Акустические методы могут конкурировать с оптическими в ситуациях, когда видимость затруднена (например, в задымленных помещениях). Обычная импульсная акустическая локация хорошо известна и широко используется. В настоящей работе был построен прототип системы, исполь-

зующей локацию на основе последовательностей максимальной длины (M-последовательностей). Как известно, M-последовательность представляет собой квазишумовой сигнал, автокорреляционная функция которого близка к дельтообразной. Локатор формирует посылку в виде M-последовательности, принимает отраженный сигнал и вычисляет корреляцию с исходной посылкой. Локация такого типа обладает высокой помехоустойчивостью и позволяет строить импульсные отклики, содержащие информацию о препятствии. Потенциально такие отклики могут использоваться для классификации препятствий (стенка, угол, конус, другой летательный аппарат).

Используя эксперименты с M-последовательностями, мы создали прототип беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на основе одноплатного компьютера, с возможностью подключения акустических датчиков (рис. 2). Это позволило создать прототип БПЛА с оригинальной акустической системой, позволяющей проводить акустические измерения и их корреляционную обработку непосредственно на летательном аппарате и, при необходимости, передавать результаты на пульт оператора в режиме реального времени. На первом этапе измерения проводились на нелетающем аппарате, закрепленном на штативе. После отработки методики проведены измерения сигнала с летающего БПЛА. Данная методика использована для измерения дифракционных откликов на рассеивателях различной формы.



Рис. 2. Пример дифракционного эксперимента с прототипом летательного аппарата.

Новые методы и результаты корреляционной обработки в задачах акустической локации

Важную роль в акустической локации играют активные методы, использующие облучение аппарата с последующей обработкой отраженных сигналов. Был разработан и прошел апробацию новый метод активной акустической локации летательных аппаратов с несущим винтом или тянущим/толкающим пропеллером. Метод заключается в облучении аппарата ЛЧМ акустическим сигналом в слышимом диапазоне, приеме отраженного сигнала и вычислении взаимной корреляцион-

ной функции. Обнаружено, что, помимо основного пика корреляционной функции, соответствующего прямому сигналу, присутствуют побочные максимумы, расположенные в области отрицательных временных задержек, что указывает на наличие у объекта вращающегося винта или лопастей [8]. Обнаружена связь между частотой вращения винта/лопастей, их количеством и положением побочных максимумов корреляционной функции. Частота вращения винта и количество лопастей влияют на амплитуду этих максимумов. Проведен модельный эксперимент, подтверждающий теоретические выводы (рис. 3). В итоге был предложен еще один информативный признак обнаружения вращающегося винта (дополнительные максимумы корреляционной функции), позволяющий проводить селекцию летательных объектов с винтом от других объектов, таких как птицы и городские постройки.

Для экспериментальной реализации развитых методов активной локации был разработан малогабаритный содар. Он представляет собой два рупора, расположенных соосно рядом друг с другом (рис. 3а). В основании одного рупора крепится излучатель, другого рупора – микрофон. Типичная корреляционная функция отклика и посылки показана на рис. 3б. Хорошо виден основной пик, расположенный в области положительных значений ct (c – скорость звука, t – время наблюдения), равных десяткам метров, а также побочные пики, расположенные в области отрицательных значений ct .

В качестве развития корреляционных методов предложено использование тройной корреляции при зондировании окружающей среды [9].

Этот метод отличается от обычного корреляционного измерения тем, что подынтегральное выражение содержит три различные функции (сигналы с разнесенных в пространстве источника и двух приемников). Это позволяет проводить сравнение локационного сигнала с двумя сигналами из разных точек пространства, тем самым не только выявлять движущиеся

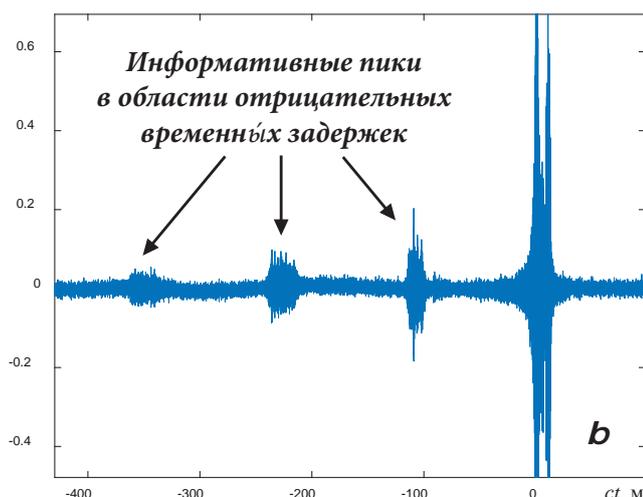
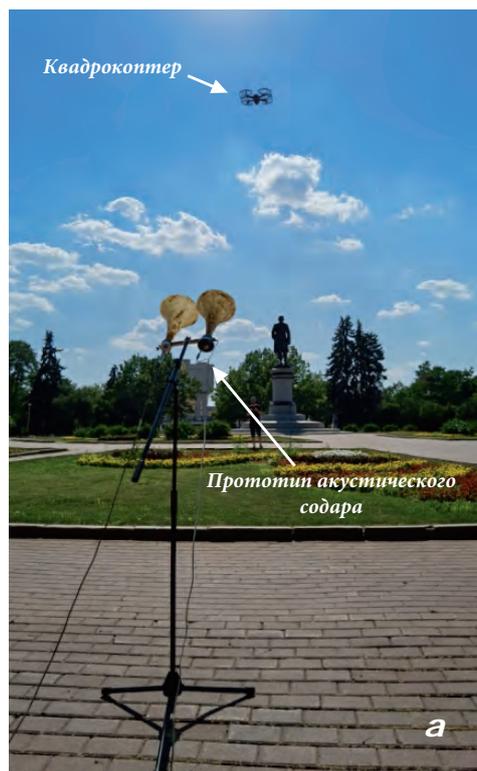


Рис. 3. Фотография эксперимента с прототипом акустического содара (а). Нормированная корреляционная функция излученного и отраженного от вращающегося винта ЛЧМ-сигнала (b) содержит дополнительные максимумы – новый информативный параметр.

объекты, но и оценивать траекторию их перемещения. Для этого анализируется двухпараметрическое множество исходных данных (относительных временных задержек), что и позволяет провести трассирование объекта. При этом используется антенна, состоящая из небольшого числа элементов. В результате численного моделирования и обработки экспериментальных данных показана возможность использования тройной корреляции (или кумулянта третьего порядка) для активной локации БТС в воздухе [9].

Для практической реализации предложен специальный квазишумовой сигнал с близкой к дельта-функции тройной корреляцией. Такой сигнал может быть полезным и для активного обнаружения БТС с вращающимся винтом методами, описанными выше. Предполагается, что использование тройной корреляции позволит построить значительную часть траектории объекта за счет отправки и приема одиночного волнового пакета с последующим анализом данных. Следует отметить, что метод тройной корреляции (а также его спектральный аналог – биспектр) известен и применяется

ся, например, в космологии, оптике, океанологии [10]. Однако в задачах активной акустической локации этот метод практически не используется. Концепция тройной корреляции ставит весьма сложную математическую задачу построения аналога М-последовательности, а именно сигнала, обладающего тройной корреляцией в виде точной дельта-функции.

Аналитическое и экспериментальное исследование дифракции на модельных объектах

В рамках проекта решались фундаментальные задачи дифракции акустических волн, связанные с локацией препятствий. Их форма может содержать особенности – например, конусные заострения и острые кромки. В частности, развиты новые экспериментальные методы, основанные на М-последовательности [11]. Построена модифицированная методика, позволяющая использовать узкополосные излучатели и измерять частотный отклик в заданном диапазоне с высоким отношением сигнал/шум. В качестве зондирующего использовался гармонический сигнал, фазоманипулированный М-последовательностью. Взаимно-корреляционная функция излучаемого сигнала и сигнала, записанного микрофоном вблизи поверхности рассеивателя (рис. 4а), позволяет оценить отклик системы. Было проведено сравнение теории с экспериментом (рис. 4б) [11]. Теоретический анализ проводился в рамках метода параболического уравнения. Задача дифракции на жестком конусе была сведена к граничному интегральному уравнению Вольтерра, которое удалось решить с помощью преобразования Фурье.

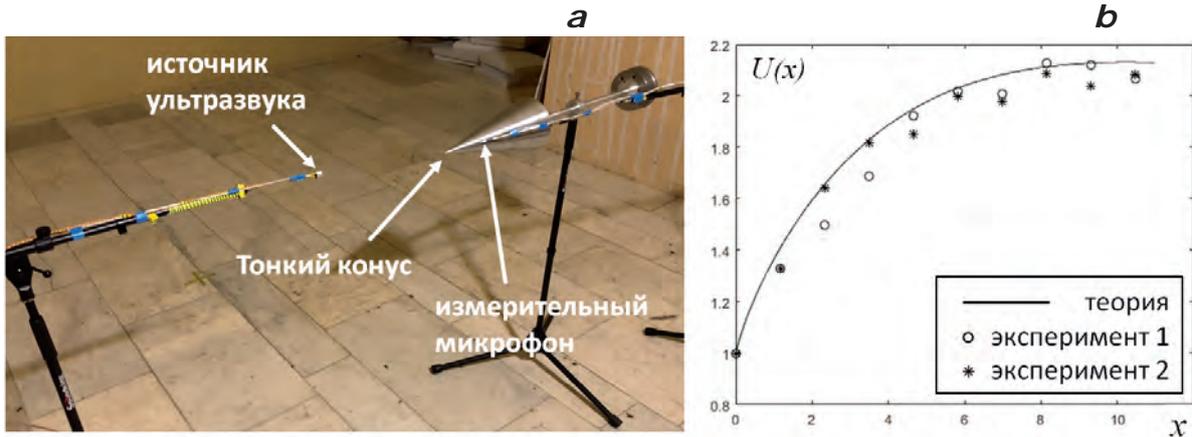


Рис. 4. Фотография эксперимента по измерению поля $U(x)$, дифрагированного на тонком конусе (а), как функции аксиальной координаты точки наблюдения x ; сравнение результатов аналитических оценок и экспериментальных данных (б) [11].

Решены канонические задачи дифракции с использованием новых математических методов в области многомерного комплексного анализа. Центральное место занимает представление поля в виде интеграла по плоским волнам. Волновое поле $u(x)$ записывается как

$$u(x) = \int_{\Gamma} A(p)W(x;p)\Psi(p), \quad (1)$$

где x – координаты в пространстве; p – точка на дисперсионной диаграмме H (многообразии комплексной коразмерности 1 в спектральном пространстве); $W(x;p)$ – плоская волна; $A(p)$ – спектральная функция на дисперсионной диаграмме; $\Psi(p)$ – дифференциальная форма на H ; Γ – гомотопия соответствующей размерности на H .

Как известно, в простейшем случае уравнения Гельмгольца на плоскости дисперсионная диаграмма H топологически представляет собой бесконечный цилиндр, точка p параметризована углом распространения волны θ , форма $\Psi = d\theta$ есть дифференциал угловой переменной:

$$W(x_1, x_2; \theta) = \exp\{ik(x_1 \cos \theta + x_2 \sin \theta)\}. \quad (2)$$

В зависимости от Γ интеграл (1) с учетом (2) представляет собой либо представление для функции Грина, либо интеграл Зоммерфельда. Аналитичность многообразия H , функции A и формы Ψ приводит к возможности деформации контура интегрирования Γ . Данное интегральное представление использовано для модельных дифракционных задач на дискретных сетках [12–14]. Эти задачи важны, поскольку имеют непосредственное отношение к численным методам теории волн. Для этих задач многообразие H топологически представляет собой тор. Различные образующие этого тора, взятые как контур Γ , порождают интеграл для функций Грина и интеграл Зоммерфельда.

Используя предложенный метод впервые удалось решить задачу дифракции на прямом угле на квадратной сетке. Для этого было построено поле мероморфных функций на соответствующих многолистных накрытиях дисперсионной диаграммы H . После этого спектральная функция A находилась по своим известным вычетам.

Развит подход к построению асимптотических оценок многомерных интегралов Фурье [15, 16]:

$$u(x_1, x_2) = \iint_{\Gamma} A(\xi_1, \xi_2) \exp\{i(\xi_1 x_1 + \xi_2 x_2)\} d\xi_1 \wedge d\xi_2, \quad (3)$$

где A имеет полюса и множества ветвления, представляющие собой аналитические множества комплексной коразмерности 1. Поверхность интегрирования Γ в (3) почти всюду близка к действительной плоскости и правильно обходит особенности подынтегрального выражения. Показано, что при больших $|\xi|$ оценка интеграла следует из принципа локальности; такая оценка представляет собой сумму членов, вычисляемых в окрестностях специальных точек функции A . Эти точки – пересечения компонент особенностей, а также точки стационарной фазы на особенностях. Соответствующие оценки получены для всех типов таких точек [15]. Данные оценки были применены к задаче о возбуждении акустической волны изгибающей волной в тонкой упругой пластине [16]. Была вычислена амплитуда импульса, возникающего на частоте фазового синхронизма упругой и акустической волн. Амплитуда этого импульса, импульсные отклики сигналов, дифрагированных на препятствиях различной формы, а также другие признаки, выявленные при аналитическом решении задач дифракции и при экспериментальном измерении дифрагированных полей, могут служить информативными параметрами как в задачах локализации летательных аппаратов, так и для их ориентации в условиях городской застройки.

Заключение

Развитие строгих математических методов решения дифракционных задач и аналитическое описание сигналов движущихся объектов совместно с практическими подходами акустической локации определили междисциплинарный характер исследования. Такой подход позволил получить результаты, формирующие задел для решения широкого круга задач дистанционной акустической

локации беспилотных транспортных средств как в активном режиме (при использовании высоких частот порядка десятков кГц), так и в более низкочастотном пассивном режиме, в том числе, в условиях городской застройки. Перспективным является развитие предложенных методик для локации подводных аппаратов, а также для классификации воздушных сверхзвуковых источников с учетом нелинейных эффектов [17]. Разумеется, гидроакустические приложения требуют учета специфических свойств водной среды и используемой аппаратуры.

Авторы выражают глубокую благодарность А.В. Шанину, Н.С. Виноградову, А.И. Королькову и В.А. Гусеву за их вклад в результаты настоящей работы.

Литература

1. **T. Bailey H., Durrant-Whyte**
IEEE Robot. Automat. Magaz., 2006, **13**(3), 108.
DOI: 10.1109/MRA.2006.1678144.
2. **J. Farlik, M. Kratky, J. Casar, V. Stary**
Sensors, 2019, **19**(7), 1517. DOI: 10.3390/s19071517.
3. **A. Sedunov, D. Haddad, H. Salloum, A. Sutin, N. Sedunov, A. Yakubovskiy**
В Proc. 2019 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST), USA, Woburn, 2019, pp. 1–7.
DOI: 10.1109/HST47167.2019.9032916.
4. **Z. Shi, X. Chang, C. Yang, Z. Wu and J. Wu**
IEEE Transact. Vehic. Technol., 2020, **69**(3), 2731.
DOI: 10.1109/TVT.2020.2964110.
5. **О.В. Руденко, В.А. Гусев**
Акустический журнал, 2020, **66**(6), 599.
DOI: 10.31857/S032079192006009X.
6. **В.Л. Гинзбург, И.М. Франк**
ЖЭТФ, 1946, **16**(1), 15.
7. **В.И. Павлов, А.И. Сухоруков**
УФН, 1985, **147**(1), 84.
8. **А.И. Корольков, К.С. Князева, А.С. Шуруп**
Акустический журнал, 2020, **66**(6), 681.
DOI: 10.31857/S0320791920060052.
9. **А.И. Корольков, К.С. Князева, А.С. Шуруп**
Известия РАН. Сер. физическая, 2022, **86**(1), 105.
DOI: 10.31857/S0367676522010173.
10. **A.W. Lohmann, B. Wornitzer**
В Proc. IEEE, 1984, **72**(7), 889. DOI: 10.1109/PROC.1984.12946.
11. **A.V. Shanin, A.I. Korolkov, A.Y. Laptev**
В Abstr. Int. Conf. Days on Diffraction 2022 (RF, St. Petersburg, May 30 – June 3, 2022), RF, Saint Petersburg, PDMI Publ., 2022, p. 54.
12. **A.V. Shanin, A.I. Korolkov**
Wave Motion, 2020, **97**, 102606. DOI: 10.1016/j.wavemoti.2020.102606.
13. **A.V. Shanin, A.I. Korolkov**
Quart. Appl. Math., 2022, **80**(2), 277. DOI: 10.1090/qam/1612.
14. **О.И. Макаров, А.В. Шанин, А.И. Корольков**
Акустический журнал, 2023, **69**(2), 129.
DOI: 10.31857/S0320791923600105.
15. **A.V. Shanin, A.I. Korolkov**
Quart. J. Mechan. Appl. Math., 2023, **76**(1), 1.
DOI: 10.1093/qjmam/hbac017.
16. **M.A. Mironov, A.V. Shanin, A.I. Korolkov, K.S. Kniazeva**
Proc. Roy. Soc. A, 2021, **477**, 20210530. DOI: 10.1098/rspa.2021.0530.
17. **О.В. Руденко, Ю.Н. Маков**
Акустический журнал, 2021, **67**(1), 3.
DOI: 10.31857/S0320791921010032.

English

Development of Autonomous Navigation System for Remote-Control Vehicles using Ultrasound Location Techniques*

Oleg V. Rudenko
Academician,

Lomonosov Moscow State University
1–2 Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, 119991, Russia
rudenko@acs366.physics.msu.ru

Andrei S. Shurup

Lomonosov Moscow State University
1–2 Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, 119991, Russia
shurup@physics.msu.ru

Abstract

Results of works on acoustic location methods applied to small airborne vehicles are presented. An experimental model has been developed with an original acoustic system for detecting and identifying obstacles based on analysis of diffraction and reflection of acoustic waves. Methods for active acoustic location have been developed, using triple correlation and properties of correlation function of chirp signals reflected from a rotating

propeller. A prototype of mobile acoustic sodar has been created that implements the new methods of active location. Original methods for solving acoustic diffraction problems, based on a generalization of Sommerfeld integral and saddle-point method, as well as asymptotic formulas for two-dimensional Fourier integral have been regarded. Acoustic transition radiation has been studied. New spectral peculiarities of signals reflected from a moving airborne vehicle are established, taking into account interaction of self-radiation and probing signal on nonlinearity of moving boundary.

Keywords: acoustic location, canonical diffraction problems, acoustic transition radiation, Doppler effect.

**The work was financially supported by RFBR (project 19-29-06048).*

Images & Tables

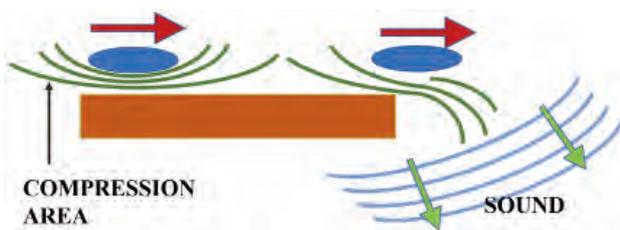


Fig. 1. Scheme of monopole and dipole transition radiation.

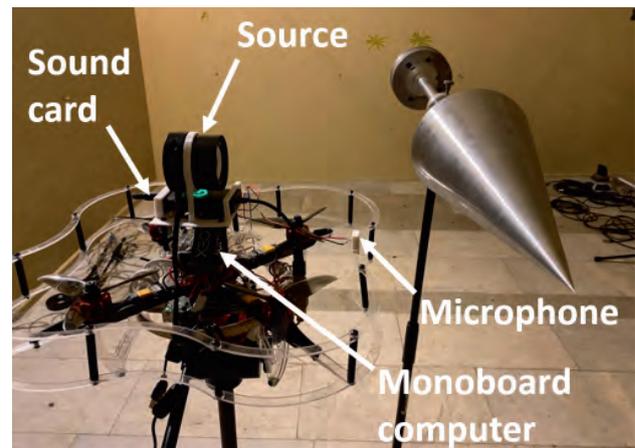


Fig. 2. An example of diffraction experiment with prototype of airborne vehicles.

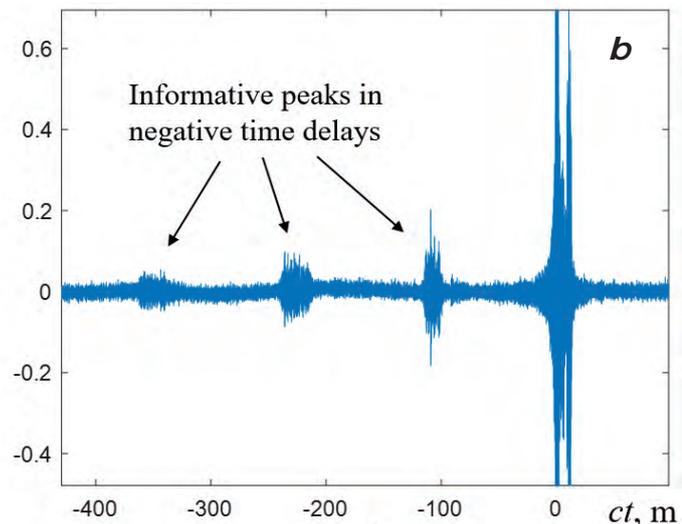
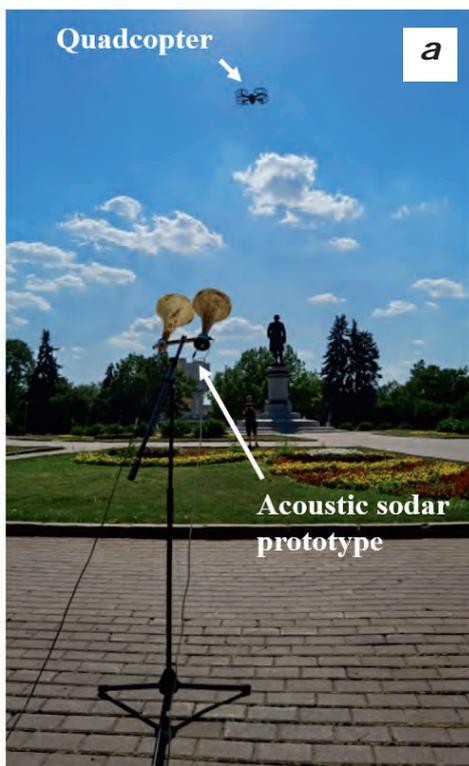


Fig. 3. Photo of experiment with the developed acoustic sodar prototype (a). The correlation function of chirp signal emitted and reflected from the rotating screw (b) contains additional maxima – a new informative parameter.

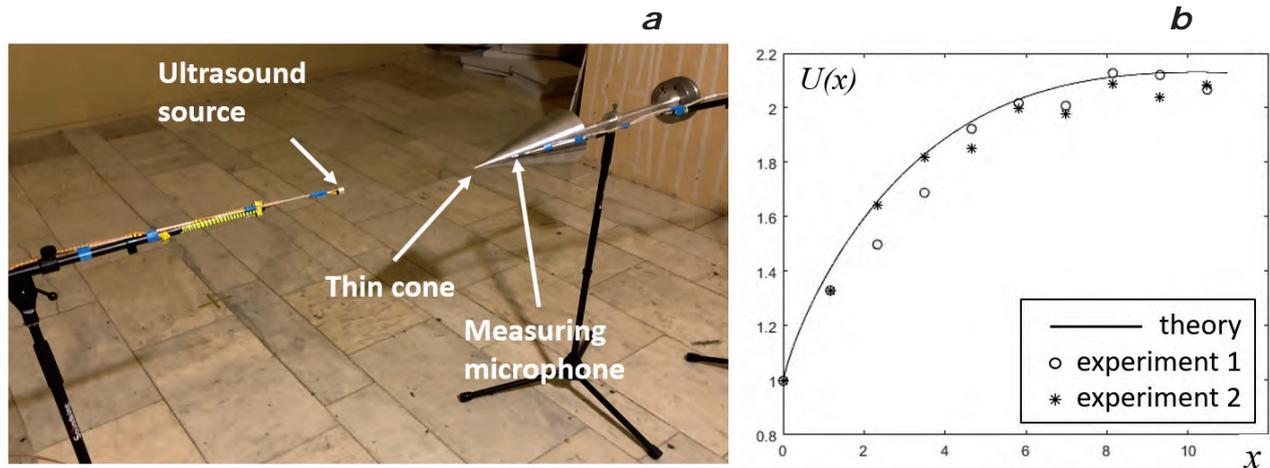


Fig. 4. Photo of experiment for measuring field $U(x)$ diffracted by a thin cone (a) as a function of axial coordinate of observation point x ; comparison of results of analytical estimates and experimental data (b) [11].

References

1. T. Bailey H., Durrant-Whyte
IEEE Robot. Automat. Magaz., 2006, **13**(3), 108.
DOI: 10.1109/MRA.2006.1678144.
2. J. Farlik, M. Kratky, J. Casar, V. Stary
Sensors, 2019, **19**(7), 1517. DOI: 10.3390/s19071517.
3. A. Sedunov, D. Haddad, H. Salloum, A. Sutin, N. Sedunov, A. Yakubovskiy
In *Proc. 2019 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST)*, USA, Woburn, 2019, pp. 1–7.
DOI: 10.1109/HST47167.2019.9032916.
4. Z. Shi, X. Chang, C. Yang, Z. Wu and J. Wu
IEEE Transact. Vehic. Technol., 2020, **69**(3), 2731.
DOI: 10.1109/TVT.2020.2964110.
5. O.V. Rudenko, V.A. Gusev
Acoust. Phys., 2020, **66**(6), 587.
DOI: 10.1134/S1063771020060093.
6. V.L. Ginzburg, I.M. Frank
Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki [Russ. J. Exp. Theor. Phys.], 1946, **16**(1), 15 (in Russian).
7. V.I. Pavlov, A.I. Sukhorukov
Uspekhi fizicheskikh nauk [Sov. Advances in Physical Sciences], 1985, **28**, 784 (in Russian).
8. A.I. Korolkov, K.S. Knyazeva, A.S. Shurup
Acoust. Phys., 2020, **66**(6), 676.
DOI: 10.1134/S1063771020060056.
9. A.I. Korolkov, K.S. Knyazeva, A.S. Shurup
Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2022, **86**(1), 70.
DOI: 10.3103/s1062873822010154.
10. A.W. Lohmann, B. Wirmitzer
In *Proc. IEEE*, 1984, **72**(7), 889. DOI: 10.1109/PROC.1984.12946.
11. A.V. Shanin, A.I. Korolkov, A.Y. Laptev
In *Abstr. Int. Conf. Days on Diffraction 2022 (RF, St. Petersburg, May 30 – June 3, 2022)*, RF, Saint Petersburg, PDMI Publ., 2022, p. 54.
12. A.V. Shanin, A.I. Korolkov
Wave Motion, 2020, **97**, 102606.
DOI: 10.1016/j.wavemoti.2020.102606.
13. A.V. Shanin, A.I. Korolkov
Quart. Appl. Math., 2022, **80**(2), 277. DOI: 10.1090/qam/1612.
14. O.I. Makarov, A.V. Shanin, A.I. Korolkov
Acoust. Phys., 2023, **69**(2), 143.
DOI: 10.1134/S1063771023600080.
15. A.V. Shanin, A.I. Korolkov
Quart. J. Mechan. Appl. Math., 2023, **76**(1), 1.
DOI: 10.1093/qjmam/hbac017.
16. M.A. Mironov, A.V. Shanin, A.I. Korolkov, K.S. Knyazeva
Proc. Roy. Soc. A, 2021, **477**, 20210530.
DOI: 10.1098/rspa.2021.0530.
17. O.V. Rudenko, Yu.N. Makov
Acoust. Phys., 2021, **67**(1), 1. DOI: 10.1134/S1063771021010036.

Робототехнический комплекс обнаружения и локализации подводных источников шума*

С.А. Переселков, В.М. Кузькин, Ю.В. Матвиенко

Разработаны методы голографической обработки шумовых сигналов для обнаружения и локализации малогабаритных подводных беспилотных транспортных средств (БТС), обладающих низким уровнем шумоизлучения. Предложена методика применения для контроля подводной обстановки автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) с малогабаритными антеннами из векторно-скалярных приемников (ВСП) на борту. Созданы облики АНПА-транспорта и АНПА-носителя с малогабаритной антенной из ВСП. Выполнены вычислительные и натурные эксперименты, проведена голографическая обработка экспериментальных данных. Предложена новая концепция построения роботизированной системы мониторинга подводной обстановки на основе голографической обработки. Обозначены перспективы развития голографической обработки для гидроакустических сигналов.

Ключевые слова: АНПА, голографическая обработка, ВСП, обнаружение, локализация, антенна, БТС.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-29-06075).

Введение

Контроль подводной обстановки, направленный на предотвращение и отражение угрозы со стороны малогабаритных малошумных подводных БТС, является одной из важнейшей задач безопасности морского государства. В США, например, получила развитие интегрированная система освещения подводной обстановки IUSS (Integrated Undersea Surveillance System), объединяющая стационарные и мобильные комплексы гидроакустического наблюдения [1]. Насколько известно авторам, в России не существует подобной интегрированной системы.

В настоящее время для решения проблемы освещения подводной обстановки, наряду с традиционными подходами пассивной локации [2], получили развитие методы, основанные на согласованной со средой обработке гидроакустических сигналов (matched-field processing) [3, 4]. Они подразумевают использование многоэлементных приемных антенн и данных о трассе распространения, позволяющих рассчитывать модельную форму сигнала. Данные алгоритмы обработки сигналов достигли предельных возможностей и не позволяют решать современные задачи обнаружения и локализации малогабаритных малошумных источников. Это стимулирует разработку современных средств контроля подводной обстановки, ориентированных на новые технологии обработки шумовых сигналов и построения технических средств, обеспечивающих мобильное обнаружение и локализацию малогабаритных малошумных подводных БТС в заданной акватории.

В работе предложена и обоснована новая концепция построения роботизированной системы освещения подводной обстановки, основанная на голографической обработке принимаемых шумовых сигналов [5, 6]. Обработка позволяет с высокой помехоустойчивостью и малой чувствительностью к вариациям параметров океанического волновода решать комплексную задачу локализации: обнаружения, разрешения, пеленгования, определения радиальной скорости (проекция скорости источника в направлении приемника), удаления и глубины малошумного источника. Ключевой фактор концепции – использование группировки гибридных АНПА [7] с антеннами из ВСП [8] и средствами обработки. Намечены перспективы развития голографической обработки шумовых сигналов для решения задач обнаружения и локализации БТС в условиях пространственно-временной изменчивости океанической среды.

Голографическая обработка

Голографическая обработка шумоизлучения подводного аппара-



ПЕРЕСЕЛКОВ
Сергей Алексеевич
профессор,
Воронежский государствен-
ный университет



КУЗЬКИН
Венедикт Михайлович
Институт общей физики РАН



МАТВИЕНКО
Юрий Викторович
Институт проблем морских
технологий ДВО РАН

та с применением одиночного ВСП строится следующим образом [5]. За время наблюдения Δt в полосе Δf для временных интервалов длительностью $\delta t_1 = (\Delta t / J - \delta t_2)$ выполняется частотно-временная обработка принятого сигнала [9] с шагом по частоте $\delta f = 1 / \delta t_1$. Здесь J и δt_2 – число независимых временных шумовых реализаций и временной интервал между ними. Определяются текущие значения комплексных амплитуд звукового давления $P(f, t)$ и трех компонент $V_{x,y,z}(f, t)$ вектора колебательной скорости частиц среды. Вычисляются частотно-временные интерференционные картины (интерферограммы) энергетических параметров шумового поля. Например, интерферограммы квадрата модуля звукового давления $I(f, t)$ и горизонтальных составляющих потока мощности $X(f, t)$, $Y(f, t)$

$$\begin{aligned} I(f, t) &= P(f, t)P^*(f, t), X(f, t) = \\ &= V_x(f, t)P^*(f, t), Y(f, t) = V_y(f, t)P^*(f, t), \end{aligned} \quad (1)$$

где верхний индекс «*» обозначает комплексно-сопряженную величину.

К интерферограммам (1) применяется двумерное частотно-временное преобразование Фурье, и вычисляются голограммы $F_I(\tau, \nu)$, $F_X(\tau, \nu)$, $F_Y(\tau, \nu)$. Применительно к интерферограмме $X(f, t)$, например, голограмма имеет вид:

$$F_X(\tau, \nu) = \int_0^{\Delta \tau} \int_{f/2}^{f/2 + \Delta f} X(f, t) \exp[i2\pi(\nu t - f\tau)] df dt. \quad (2)$$

Здесь ν и τ – частота и время голограммы; $f_{1,2} = f_0 \pm (\Delta f / 2)$, f_0 – средняя частота спектра. На голограмме (2) спектральная плотность сигнала движущегося источника сконцентрирована в двух узких полосах, зеркально перевернутых относительно начала координат, в виде фокальных пятен, вызванных интерференцией мод разных номеров. Они размещены в первом и третьем квадрантах голограммы, если радиальная скорость источника $w < 0$ (источник приближается к приемнику), и во втором и четвертом квадрантах ($w > 0$), если источник уда-

ляется от приемника. При неподвижном или движущемся источнике с радиальной скоростью $w = 0$ координаты пиков фокальных пятен расположены на оси времени t . Область локализации содержит $(M - 1)$ главных максимумов с координатами (τ_μ, ν_μ) , расположенными на прямой $\nu = \varepsilon t$ с угловым коэффициентом $\varepsilon = v_\mu / \tau_\mu$, где M – число мод, формирующих поле, $\mu = 1, \overline{M-1}$ – номер фокального пятна. Ближайший к началу координат максимум первого фокального пятна, обусловленный интерференцией соседних мод, приходится на значения (τ_1, ν_1) . Координаты соседнего пика, вызванного интерференцией мод номеров $(m, m+2)$, расположены в точке (τ_2, ν_2) и т. д. И, наконец, координаты самого удаленного пика, продиктованного интерференцией первой и последней моды – (τ_{M-1}, ν_{M-1}) . В точках с координатами (τ_μ, ν_μ) суммируются $(M - \mu)$ главных максимумов. Помеха распределена по всей плоскости (τ, ν) голограммы.

При условии $r_0 \gg |w|\Delta t$, где r_0 – удаление источника от приемника в начальный момент времени $t = 0$, радиальная скорость и начальное удаление равны

$$\dot{w}_0 = -2\pi \kappa_{w\mu} \nu_\mu, \quad \dot{r}_0 = \kappa_{r\mu} \tau_\mu,$$

где $\kappa_{w\mu} = [\overline{h_{m(m+\mu)}(f_0)}]^{-1}$, $\kappa_{r\mu} = 2\pi [\overline{dh_{m(m+\mu)}(f_0)/df}]^{-1}$ – коэффициенты, определяющие пространственные и частотные масштабы изменчивости передаточной функции волновода [10].

Здесь $h_{mn} = h_m - h_n$, h_m – горизонтальное волновое число m -й моды. Восстановленные параметры источника и характеристики шумовых сигналов, в отличие от их истинных значений, отмечены точкой сверху. Черта сверху означает усреднение по номерам мод.

Спектральная плотность сигнала сосредоточена в полосе, ограниченной прямыми

$$\nu = \varepsilon t + \delta \nu, \quad \nu = \varepsilon t - \delta \nu,$$

где $\delta \nu = 1 / \Delta t$ – полуширина фокальных пятен в направлении оси частоты ν . Вне этой полосы спектральная плотность практически подавлена. В направлении оси времени t полуширина фокальных пятен $\delta \tau = 1 / \Delta f$.

Далее под входным отношением «сигнал–помеха» (с/п) q_0 понимается отношение уровня локализованного шума БТС к уровню распределенного шума акватории. В качестве критерия обнаружения источника принимается условие, согласно которому максимум функции углового распределения спектральной плотности (функции обнаружения) звукового давления при входном отношении с/п.

$$G_I(\chi, q_0) = \int_0^{\Delta \tau} |F_I(\tau, \chi \tau, q_0)| d\tau.$$

Значение функции обнаружения в направлении $\chi = \varepsilon$ расположения пиков фокальных пятен сигнала в два и более раз превышает помеховый уровень в направлениях $\chi \neq \varepsilon$

$$G_I[\varepsilon, q_0] \geq 2G_I(\chi, q_0). \quad (3)$$

Здесь Δt – линейный размер области концентрации по оси времени τ ; χ – варьируемое значение углового коэффициента при интегрировании вдоль прямых $v = \chi\tau$. За оценку ε принимается положение максимального пика $\max G_I(\chi) = G_I(\varepsilon)$.

Направление на источник, пеленг ϕ , оценивается по отношению максимумов функций обнаружения горизонтальных составляющих потоков мощности

$$\operatorname{tg}\phi(q_0) = \frac{G_Y(\varepsilon, q_0)}{G_X(\varepsilon, q_0)}. \quad (4)$$

Определение пеленга неоднозначно: значения ϕ , $\phi + \pi$, согласно (4), равнозначны. Области голограмм $F_X(\tau, v)$, $F_Y(\tau, v)$, $F_I(\tau, v)$ за пределами полосы концентрации спектральной плотности очищаются от помехи и выполняются обратные двумерные преобразования Фурье по восстановлению двумерных интерферограмм $\dot{X}(f, t)$, $\dot{Y}(f, t)$, $\dot{I}(f, t)$. Неоднозначность пеленга устраняется при рассмотрении в фиксированный момент времени t_* на частоте f_* отношений интерферограмм

$$\alpha_x = \frac{\dot{X}(f_*, t_*)}{\dot{I}(f_*, t_*)}, \quad \alpha_y = \frac{\dot{Y}(f_*, t_*)}{\dot{I}(f_*, t_*)}.$$

Если: а) $\alpha_x > 0$, $\alpha_y > 0$, то источник расположен в I-ом квадранте ВСП; б) $\alpha_x < 0$, $\alpha_y > 0$ – во II-м квадранте; в) $\alpha_x < 0$, $\alpha_y < 0$ – в III-м квадранте; г) $\alpha_x > 0$, $\alpha_y < 0$ – в IV-м квадранте.

По одной из восстановленных интерферограмм вычисляется огибающая сигнала и через отношение амплитуд соседних мод оценивается глубина источника; алгоритм разрешения нескольких шумовых источников изложен в [8]. Для решения задач обнаружения, пеленгования, восстановления глубины и разрешения знания о шумовом сигнале, помехе и передаточной функции волновода не требуются.

Отношение с/п q_1 на выходе голографической обработки оценивается как

$$\dot{q}_1 = J\gamma q_0,$$

где $\gamma = S_n / S_s$ – коэффициент концентрации, S_n и S_s – площади областей голограммы распределения спектральных плотностей помехи и сигнала [5].

На основе изложенных выше голографических подходов к обработке шумовых сигналов в проекте получены следующие результаты в рамках разработки методов обнаружения и локализации БТС, обладающих низким уровнем шумоизлучения.

Применительно к одиночному приемнику оценена минимальная длительность шумового сигнала, минимизирующая предельное входное отношение с/п q_0 , при котором сохраняется работоспособность голографической обработки

$$\min \delta t_1 = (5r/2\pi) |(dh_{1M}(f_0))/df|, \quad (5)$$

где r – расстояние между источником шума и приемником. Если длительность шумового сигнала $\delta t_1 < \min \delta t_1$, то искажается конфигурация спектральной плотности голограммы и увеличивается погрешность восстановления параметров шумового источника. В зависимости от входного отношения с/п q_0 и времени наблюдения Δt максимальная

дальность обнаружения источника оценивается как

$$r_{\max} = (2\pi/5) \sqrt{q_0/1.5} [\Delta t / |gh_{1M}(f_0)df|] \quad (6)$$

Значения $\min \delta t_1$ и r_{\max} определяются параметрами передаточной функции волновода. Оценки (5), (6) снабжены результатами численного моделирования.

Для горизонтально-однородных волноводов разработаны два варианта адаптивных алгоритмов голографической обработки определения радиальной скорости и удаления источника при малом входном отношении с/п в отсутствии информации о гидроакустических характеристиках океанической среды. Они строятся на основе измерений пеленга и частотных смещений интерференционных пиков между двумя горизонтально разнесенными приемниками. Тем самым расширяются возможности применения голографической обработки в тех случаях, которые не доступны для других известных методов обработки. В рамках численных экспериментов показана их эффективность.

Применительно к одиночному приемнику построена теория вероятностных характеристик обнаружения шумового сигнала по критерию Неймана – Пирсона. Получены выражения для кривых обнаружения, представляющие собой зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения с/п при фиксированной вероятности ложной тревоги. Определены пороговые сигналы на выходе голографической обработки при наличии шумового сигнала источника и в его отсутствие. Для частных случаев результаты численного моделирования показаны на рис. 1.

На основе критерия (3) и данных о спектральных характеристиках шумового сигнала и фоновой помехи разработан алгоритм оценки предельной дальности обнаружения шумового источника одиночным ВСП. Сформулированы условия

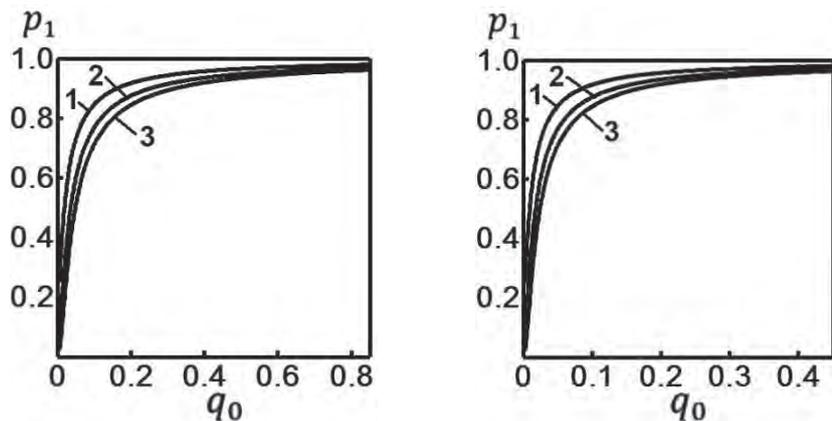


Рис. 1. Зависимость вероятности правильного обнаружения p_1 от входного отношения c/n q_0 для разных значений вероятности ложной тревоги p_2 ; а – $J=10$; б – $J=20$. Кривая 1 – $p_2=10^{-1}$, кривая 2 – $p_2=10^{-2}$, кривая 3 – $p_2=10^{-3}$. Коэффициент концентрации $\gamma=7$ [5].

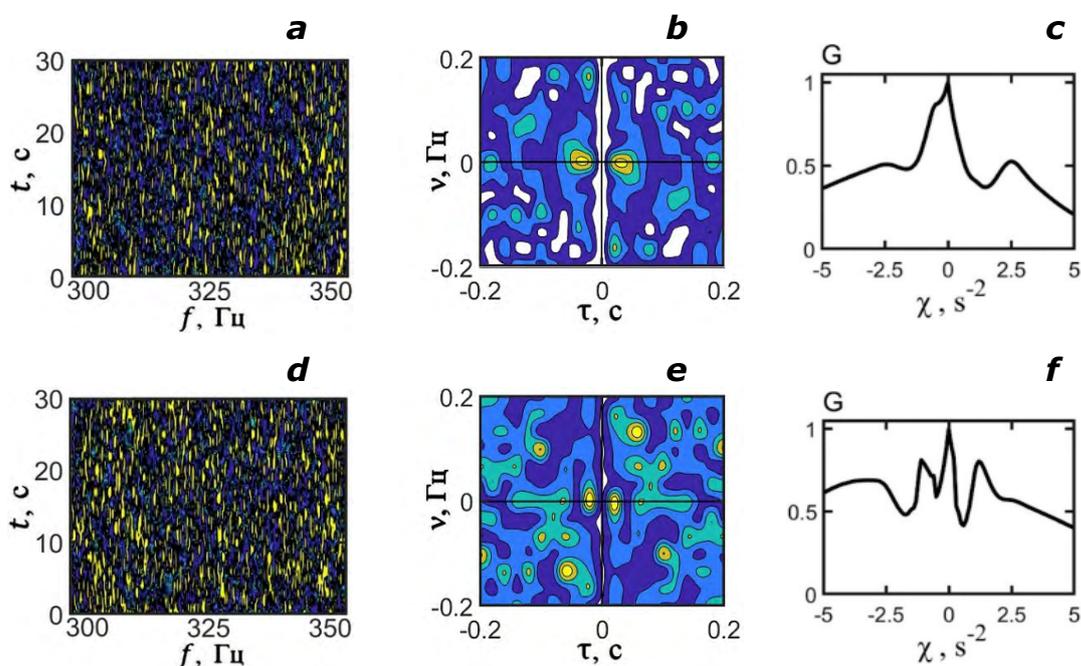


Рис. 2. Нормированные интерферограммы (а, d), голограммы (b, e) и функции обнаружения (c, f). Расстояния: (а, b, c) – 11.0 км, (d, e, f) – 11.5 км [5].

формирования неискаженной интерферограммы, которые накладывают ограничения на ширину полосы и время наблюдения в зависимости от расстояния, радиальной скорости и пространственно-частотных масштабов изменчивости передаточной функции волновода. На рис. 2, на основе данных численного моделирования звукового поля и экспериментальных данных спектров шумоизлучения АНПА и фонового шума в мелководной акватории глубиной 60 м [11], приведены результаты голографической обработки в полосе 300–350 Гц при скорости движения 2 м/с. Из рис. 2 c, f, согласно алгоритму (3), следует оценка максимальной

дальности обнаружения $r_{max}=11.0$ км. Это показывает, что N стационарных АНПА с одиночными ВСП на борту способны контролировать рубежную линию протяженностью $L=20N$ км. Оценка дальности отвечает входному отношению c/n $q_0=-10$ дБ и вероятностям правильного обнаружения $p_1=0.87, 0.82, 0.77$ при вероятностях ложной тревоги $p_2=0.1, 0.01, 0.001$. Взаимосвязь критерия дальности обнаружения с теорией обнаружения состоит в следующем. На основе критерия (3) определяется входное отношение c/n q_0 и для заданной вероятности ложной тревоги p_2 вычисляется вероятность правильного обнаружения p_1 .

Разработан голографический метод выделения мод и оценок их параметров (амплитуды, горизонтального волнового числа, модального коэффициента затухания и групповой скорости) в мелководных акваториях с использованием одиночного ВСП. Метод основан на двумерном частотно-временном преобразовании Фурье вещественной части амплитуды поля движущегося источника. На

выходе интегрального преобразования спектральная плотность концентрируется в форме фокальных пятен, отвечающих отдельным модам. Установлена связь между фазовыми и групповыми скоростями мод с координатами пиков фокальных пятен. Получены выражения, связывающие спектральную плотность голограмм с амплитудой и модальным коэффициентом затухания. Фильтрация фокальных пятен и применение к ним обратного двумерного преобразования Фурье восстанавливает поля выделенных мод. В рамках численного моделирования продемонстрирована погрешность восстановления параметров мод. Предлагаемый подход позволяет рассмотреть и объединить гораздо больший круг задач по выделению мод, нежели преобразование Вигнера [12] и оператор time-warping [13].

Разработана голографическая обработка шумового сигнала с применением линейных антенн. Установлена связь спектральной плотности голограммы, формируемой источником, с апертурой и угловой зависимостью принимаемого поля. Оценены коэффициент усиления, характеристика направленности антенны и помехоустойчивость голографической обработки. В зависимости от входного отношения с/п на элементе антенны получено выражение для максимального удаления шумового источника, при котором сохраняется устойчивое обнаружение и оценки параметров шумового источника близки к реальным значениям. По сравнению с одиночным приемником максимальная дальность обнаружения шумового источника (6) возрастает примерно в \sqrt{B} раз, где B – число элементов антенны. Представлены результаты численного моделирования.

Для линейных антенн на основе критерия Неймана – Пирсона построена теория вероятностных характеристик обнаружения шумового сигнала голографическим методом. Получены выражения для вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги в зависимости от отношения с/п и числа элементов антенны. Приведены кривые обнаружения шумового сигнала. Введено понятие коэффициента результативности обнаружения: отношение вероятности правильного обнаружения с использованием антенны к вероятности правильного обнаружения с применением одиночного приемника при заданной вероятности ложной тревоги. Выигрыш в вероятностях правильного обнаружения между одиночным приемником и антенной сосредоточен преимущественно в области малых входных отношений с/п. С повышением числа элементов антенны B значение коэффициента результативности увеличивается. С возрастанием значений отношения с/п коэффициент результативности уменьшается и асимптотически стремится к единице. Выполнены численные расчеты.

Разработан и протестирован программно-алгоритмический комплекс автоматизированной системы обнаружения и определения параметров источника шума на основе голографической обработки его шумоизлучения. Тестирова-

ние проведено: в различных гидрологических условиях; в разной фоновой помеховой обстановке, на фоне интенсивных локализованных помех и в условиях отсутствия знания о передаточной функции среды. Результаты тестирования положительные и подтверждены пятью свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ и одним патентом.

Робототехнические средства

Для технической реализации решаемой проблемы предложено использовать робототехнические средства.

В работе предложена новая концепция построения роботизированной системы освещения подводной обстановки, основанная на голографической обработке принимаемых шумовых сигналов [5]. Ключевой фактор концепции – использование группировки гибридных АНПА, то есть классических АНПА, способных работать дополнительно в режиме подводного планера (глайдера) [7]. На борту каждого из них размещается малогабаритная приемная антенна из элементов ВСП [8] и средств обработки. Гибридный АНПА осуществляет индивидуальные маневры (курс, скорость и глубина) в соответствии с введенным и периодически корректируемым по каналам связи заданием, передаваемым с пункта управления. Информационный обмен между АНПА и пунктом управления обеспечивается средствами гидроакустической, радио- и спутниковой связи.

Группировка АНПА выставляется на заданную акваторию с установленной продолжительностью и размером контролируемой области. Группировка состоит из АНПА-транспорта и группы АНПА-носителя для приема шумовых сигналов. АНПА-транспорт обеспечивает старт с носителя и переход в точку назначенными координатами в подводном положении. Гибридные АНПА с антеннами из ВСП на борту рассредотачиваются по району акватории и с применением гологра-

фической обработки выполняют обнаружение и локализацию малозумных движущихся подводных БТС. При этом каждый АНПА-носитель осуществляет индивидуальные маневры в соответствии с введенным и периодически корректируемым по каналам связи заданием.

В области реализации мобильного робототехнического комплекса контроля подводной обстановки получены следующие важные результаты.

Разработана методика применения АНПА-транспорта с единичным ВСП на борту для обнаружения и локализации малозумных БТС, основанная на голографической обработке шумоизлучения источника.

Разработана методика применения АНПА-носителя с малогабаритной антенной из ВСП на борту для контроля подводной обстановки. Его отличительными особенностями являются два фактора. Первый фактор – в транспортном положении антенна встроена в корпус аппарата. Второй фактор – в рабочем положении антенна формируется из стационарной, встроеной в корпус АНПА, и выносной, связанной с АНПА гидроакустической линией связи. По отношению к АНПА-транспорту с одиночным ВСП повышается помехоустойчивость обработки примерно в V раз.

Предложен проект АНПА-транспорта, несущего на борту ВСП. Его особенностью является наличие системы управления плавучестью, формирующей минимальные положительные или отрицательные плавучести, позволяющие в режиме глайдера перемещаться под водой. Аппарат оснащен системами изменения плавучести и устойчивости, обеспечивающими возможность изменения его функций. Предлагаемая конфигурация наряду с обычными функциями АНПА обеспечивает возможность реализации режима подводного глайдера для выхода в заданный район патрулирования подводной обстановки, возможность реализации малозумной приемной гидроакустической станции с управ-

ляемым режимом движения по толще воды и режим радиобуа со средствами навигации и связи.

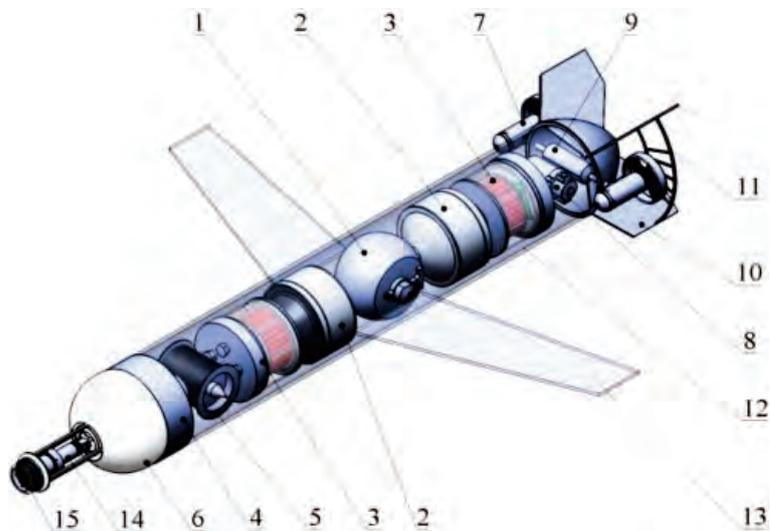


Рис. 3. Конструктивный облик гибридного АНПА контроля подводной обстановки: 1 – система регулирования момента устойчивости; 2 – система регулирования плавучести; 3 – блок электроники и аккумуляторных батарей; 4 – улавливающее устройство для выпускаемого модуля ВСП; 5 – устройство выдачи/приема выпускаемого модуля ВСП; 6 – выпускаемый модуль ВСП; 7 – маршевый двигатель; 8 – блок управления привода поворота маршевых двигателей; 9 – привод поворота маршевых двигателей; 10 – стабилизатор; 11 – защита двигателей; 12 – каркас-обтекатель аппарата; 13 – крыло; 14 – антенны радиосвязи; 15 – приемник спутниковой навигационной системы.

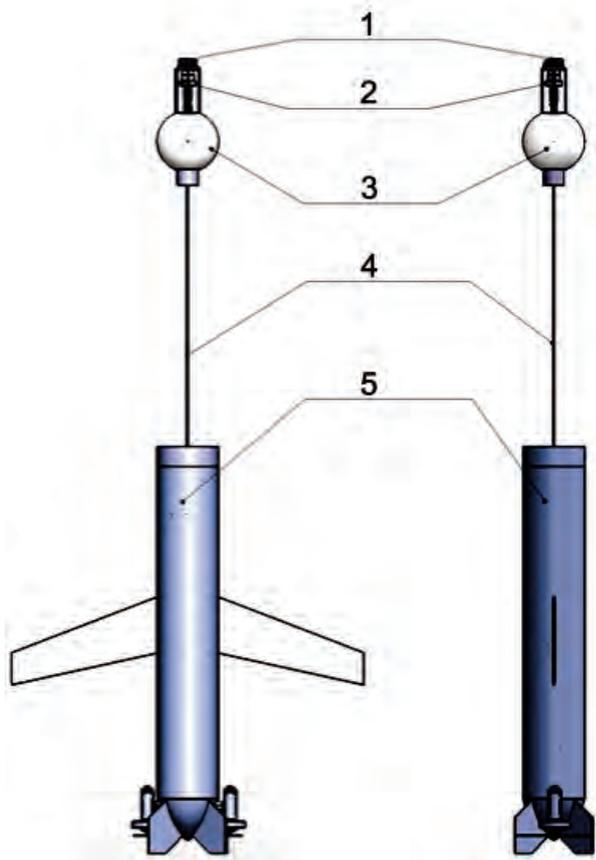


Рис. 4. Конструктивный облик гибридного АНПА в режиме приемной станции: 1 – приемник спутниковой навигационной системы; 2 – антенны радиосвязи; 3 – всплывающий модуль ВСП; 4 – кабель связи ВСП; 5 – гибридный АНПА.

Таблица 1. Ориентировочные технические характеристики гибридного АНПА

Характеристика	Значение
Масса на воздухе, не более, кг	100
Размеры, не более: длина×ширина×высота, м	2.3×1.7×0.4
Предельная рабочая глубина, м	500
Энергоемкость системы энергообеспечения, Вт·ч	2·10 ²⁴
Максимальная скорость хода в режиме АНПА, не менее, м/с	2.0
Автономность хода в режиме АНПА на максимальной скорости, не менее, км	10
Скорость вертикального перемещения в режиме приемной станции, м/с	0.01–0.03
Максимальная скорость хода в режиме глайдера, м/с	0.35
Автономность хода в режиме глайдера, не менее, месяцев (суммарная дальность горизонтального хода – не менее 1 500 км)	2

Предлагаемый проект гибридного АНПА развивает идеи, заложенные при создании АНПА [7], и отличается возможностями решения задач назначения на борту аппарата в реальном времени, порядком формирования функционального облика и доставки результатов в пункт управления. Изображение предлагаемого аппарата приведено на *рис. 3*, его вид в режиме приемной станции с выпущенным модулем ВСП показан на *рис. 4*, а основные характеристики сведены в *табл. 1*.

Натурные и численные эксперименты

В данном разделе изложены результаты вычислительных и натурных экспериментов, выполненных в рамках проекта.

На стационарной трассе по данным натурного эксперимента (SWARM-95) [14] и численного моделирования в частотном диапазоне 40–620 Гц проанализирована устойчивость голографической обработки широкополосного сигнала на фоне интенсивных внутренних волн (ИВВ), вызывающих горизонтальную рефракцию и взаимодействие мод звукового поля. Экспериментально реконструирована передаточная функция невозмущенного волновода. Разработан алгоритм передачи неискаженного модуля спектра источника при наличии гидродинамических возмущений среды распространения.

Проведены эксперименты в морских заливах с применением приемных систем из ВСП. Реализованы трассы различных геометрических конфигураций. На основе голографической обработки выполнено обнаружение малогабаритного БТС и определение пеленга, радиальной скорости и удаленности. Обработка реализована в частотном диапазоне несколько сот герц.

В рамках численного эксперимента в частотном диапазоне несколько сот герц продемонстрирована устойчивость работы АНПА-носителя с малогабаритной антенной из ВСП на борту по отношению к ИВВ, приводящих к горизонтальной рефракции и взаимодействию мод звукового поля источника. Использование малогабаритных антенн уменьшает относительную ошибку восстановления интерферограммы невозмущенного поля, что объясняется пространственным усреднением возмущения по элементам антенны.

В мелководной акватории Черноморского побережья на фоне интенсивного надводного судоходства проведен эксперимент по обнаружению и идентификации малоразмерного БТС гидроакустической системой из разнесенных в пространстве трех ВСП [15]. Голографическая обработка осуществлена в частотном диапазоне 0.7–1.7 кГц. Подводный аппарат обнаружился и локализовался на всех дальностях, которые были заданы условиями проведения эксперимента. Определены пеленги и траектории движения. При движении БТС входное отношение с/п изменялось в пределах от –11 дБ до 9 дБ.

В мелководной акватории Тихоокеанского побережья выполнены измерения спектра шумоизлучения БТС в частотном диапазоне от 50 до 1 000 Гц для дальней зоны аппарата [11]. Спектральные уровни звукового давления зарегистрированы при различных режимах и условиях движения. Спектральные характеристики в дальней зоне позволяют получить реалистические оценки дальности обнаружения аппарата в широком диапазоне частот при разных режимах работы и скоростях движения, и, как следствие, оценить размер контролируемой зоны исследуемой акватории.

Выполнены численные эксперименты по апробации голографического метода выделения мод в мелководной акватории на фоне ИВВ, обуславливающих горизонтальную рефракцию и взаимодействие волн поля источника. Рассмотрены случаи неподвижного и движущегося источника. В обоих случаях не происходит потеря идентичности параметров мод: моды выделяются, их параметры восстанавливаются. Определены вариации амплитуд, фазовых и групповых скоростей мод. Групповые скорости мод обнаруживают весьма слабую чувствительность к влиянию ИВВ.

Заключение

Таким образом, в выполненном проекте разработаны методы голографической обработки шумовых сигналов

для обнаружения и локализации малогабаритных подводных БТС, обладающих низким уровнем шумоизлучения. В рамках разработанных голографических методов установлены простые и явные связи между восстанавливаемыми параметрами подводного источника шума и спектральной плотностью голограммы по разным каналам ВСП.

Предложена новая концепция построения роботизированной системы освещения подводной обстановки, основанная на голографической обработке принимаемых шумовых сигналов. Ключевой фактор концепции – использование группировки гибридных АНПА, то есть классических АНПА, способных работать дополнительно в режиме подводного планера (глайдера). На борту каждого из них размещается малогабаритная приемная антенна из элементов ВСП и средств голографической обработки.

В рамках численных и натуральных экспериментов протестированы теоретические положения голографической обработки обнаружения и локализации малошумных малогабаритных источников. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенных голографических подходов для контроля подводной обстановки с применением приемных систем из ВСП.

Что же касается перспективности развития данного направления, то важно обозначить следующие области исследований.

Во-первых, разработка и апробация адаптивных алгоритмов го-

лографической обработки шумовых сигналов для обнаружения и локализации малошумных источников в условиях пространственно-временной изменчивости характеристик среды распространения. Тем самым будет открыта возможность восстановления параметров шумовых подводных источников посредством наблюдаемых величин, то есть величин, которые могут быть непосредственно измерены в условиях малого входного отношения с/п, не требующих знания о передаточной функции волновода.

Во-вторых, обобщение голографической обработки шумовых сигналов на случай мелководной акватории с неоднородной батиметрией. Оценка погрешности восстановления параметров малошумных подводных источников. Проведение экспериментальной верификации алгоритма обработки. В результате существенно расширяется круг задач по контролю подводной обстановки в условиях пространственно-временной изменчивости характеристик среды распространения, вообще поддающихся решению.

В-третьих, построение многомерных алгоритмов $(H + 2)D$ голографической обработки шумовых сигналов, принимаемых антеннами из ВСП, позволяющих повысить помехоустойчивость при работе в широкой полосе частот. Здесь H – число параметров, характеризующих расположение элементов антенны в пространстве. Например, если элементы антенны расположены на прямой линии, то $H=1$, если расположены на плоскости, то $H=2$. Предложенная выше голографическая обработка шумового сигнала с применением линейных антенн не позволяет реализовать помехоустойчивую обработку в широком диапазоне частот.

В-четвертых, оценка шумового портрета малогабаритного АНПА, то есть определение мощности излучения в заданном частотном диапазоне. Решение поставленной задачи возможно в результате объединения голографической обработки с кепстральным методом выделения сигналов.

По результатам, полученным в проекте, подготовлена монография [6].

В настоящее время коллектив авторов продолжает совместные научно-исследовательские работы в рамках проекта, поддержанного Российским научным фондом №23-61-10024, rscf.ru/project/23-61-10024/.

Литература

1. *National Security Strategy*, USA, Washington, The White House, 2015, 29 pp. (https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/docs/2015_national_security_strategy_2.pdf).
2. Ю.А. Корякин, С.А. Смирнов, Г.В. Яковлев *Корабельная гидроакустическая техника: состояние и актуальные проблемы*, РФ, Санкт-Петербург, Наука, 2004, 410 с.
3. D. Gingrass *J. Acoust. Soc. Am.*, 1989, **86**, 1940. DOI: 10.1109/MDSP.1989.97041.
4. А.Г. Сазонтов, А.И. Малеханов *Акустический журнал*, 2015, **61**(2), 233. DOI: 10.7X68/S0320791915020124.
5. С.А. Переселков, В.М. Кузькин *Известия РАН. Серия физическая*, 2023, **87**(4), 598. DOI: 10.31857/S036767652270106X.
6. С.А. Переселков, В.М. Кузькин *Голографическая обработка широкополосных гидроакустических сигналов*, РФ, Воронеж, Издательский дом ВГУ, 2023, 183 с.
7. Ю.В. Матвиенко, В.В. Костенко, В.А. Гой, Ю.А. Хворостов *Пат. РФ*, 2664971, 2018.
8. В.А. Гордиенко *Векторно-фазовые методы в акустике*, РФ, Москва, Физматлит, 2007, 480 с.
9. М.И. Вашкевич, И.С. Азаров *Цифровая обработка сигналов*, 2020, №2, 13.

10. Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов
Теоретические основы акустики океана, СССР, Ленинград, Гидрометеиздат, 1982, 264 с.
11. Ю.А. Хворостов, Ю.В. Матвиенко, В.М. Кузькин, С.А. Пересёлков, С.А. Ткаченко
Подводные исследования и робототехника, 2022, №4(42), 84. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_42_04_08.
12. А.И. Белов, Г.Н. Кузнецов
Акустический журнал, 2014, 60(2), 190. DOI: 10.7868/S0320791914010055.
13. J. Bonnel, N.R. Chapman
J. Acoust. Soc. Am., 2011, 130, EL101. DOI: 10.1121/1.3611395.
14. J.R. Apel, M. Badiey, C.-S. Chiu, S. Finette, R.H. Headrick, J. Kemp, J.F. Lynch, A.E. Newhall, M.H. Orr, B.H. Pasewark, D. Tielburger, A. Turgut, K. von der Heydt, S.N. Wolf
IEEE J. Ocean. Eng., 1997, 22, 465. DOI: 10.1109/48.611138.
15. Ю.В. Матвиенко, Ю.А. Хворостов, А.В. Каморный, М.Ю. Глуценко, В.М. Кузькин, С.А. Пересёлков
Подводные исследования и робототехника, 2022, №3(41), 4. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_41_03_01.

English

Robotic Complex for Detection and Localization of Underwater Noise Sources*

Sergey A. Pereselkov

Professor,
Voronezh State University
1 Universitetskaya Sqr., Voronezh, 394018, Russia
pereselkov@yandex.ru

Venedikt M. Kuz'kin

Prokhorov General Physics Institute, RAS
38 Vavilov Str., Moscow, 119991, Russia
kumiov@yandex.ru

Yuri V. Matvienko

Institute of Marine Technology Problems, FEB RAS
5a Sukhanova Str., Vladivostok, 690091, Russia
ymat33@yandex.ru

Abstract

Methods for holographic processing of noise signals have been developed for the detection and localization of small-sized underwater unmanned vehicles (UVs) with a low level of noise emission. A technique has been proposed for using autonomous uninhabited underwater vehicles (AUVs) with small-sized vector-scalar receiver (VSR) antennas on board to monitor the underwater environment. The appearances of the AUV-transport and AUV-carrier with a small-sized VSR antenna were created. Computational and full-scale experiments were performed, and holographic processing of experimental data was carried out. A new concept for constructing a robotic system for monitoring the underwater environment based on holographic processing is proposed. Prospects for the development of holographic processing for hydroacoustic signals are outlined.

Keywords: AUV, holographic processing, VSR, detection, localization, antennae, UV.

*The work was financially supported by RFBR (project 19-29-06075).

Images & Tables

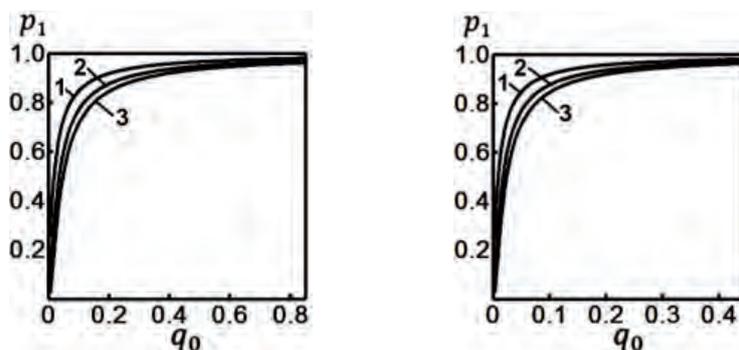


Fig. 1. Dependence of the probability of correct detection p_1 on the input ratio signal/interference q_0 for different values of the probability of false alarm p_2 ; a - $J=10$; b - $J=20$. Curve 1 - $p_2=10^{-1}$, curve 2 - $p_2=10^{-2}$, curve 3 - $p_2=10^{-3}$. Concentration coefficient $\gamma=7$ [5].

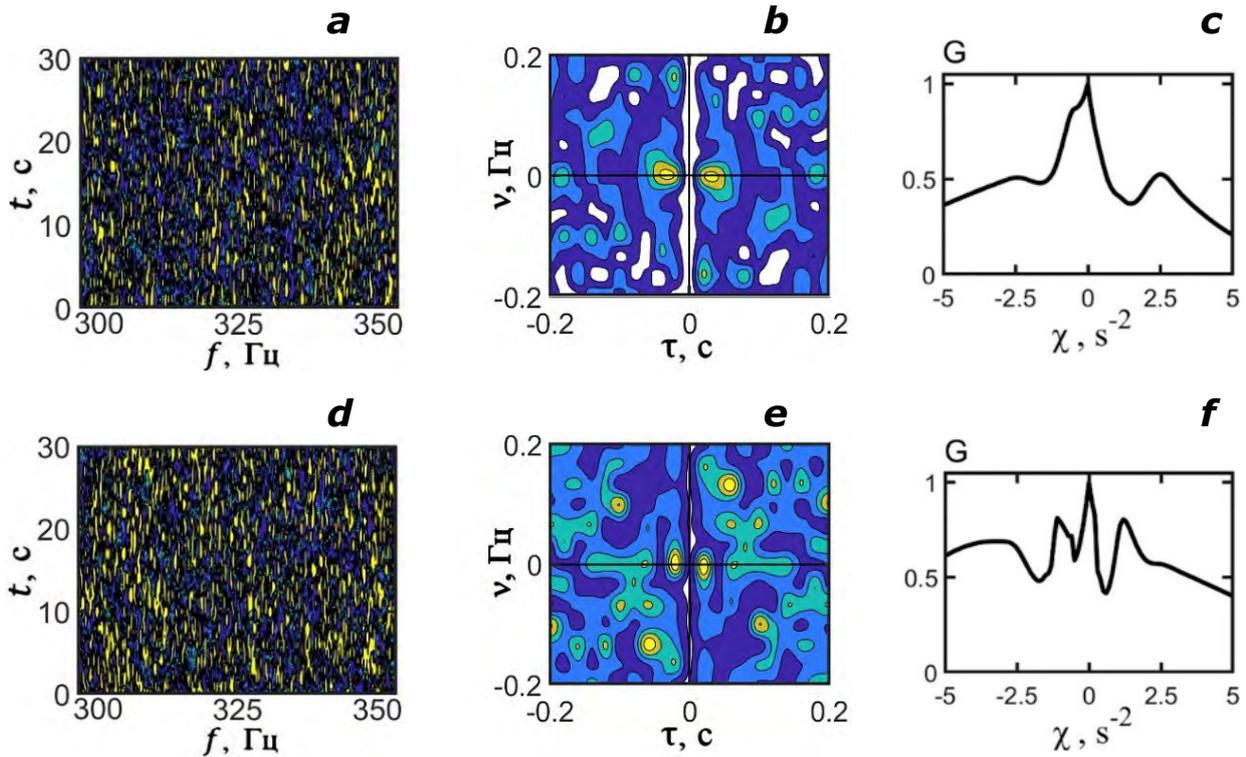


Fig. 2. Normalized interferograms (a, d), holograms (b, e) and detection functions (c, f). Distances: (a, b, c) – 11.0 km, (d, e, f) – 11.5 km [5].

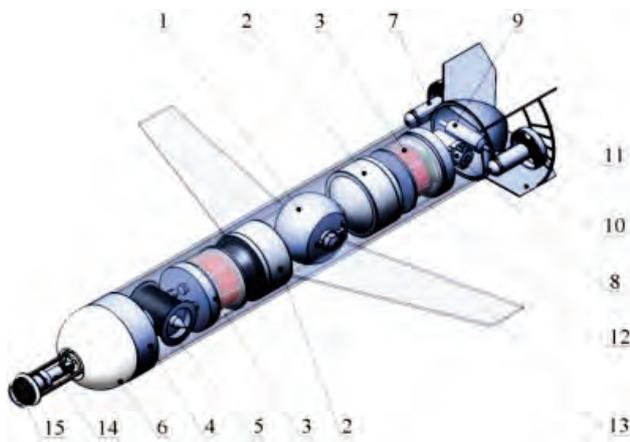


Fig. 3. The design of the hybrid AUV for monitoring the underwater situation: 1 – system for regulating the moment of stability; 2 – buoyancy control system; 3 – electronics and battery unit; 4 – catcher of the produced VSR module; 5 – device for issuing/receiving the VSR module; 6 – the VSR module; 7 – main engine; 8 – control unit for the rotation drive of the main engines; 9 – drive of rotation of main engines; 10 – stabilizer; 11 – protection of engines; 12 – fairing frame of the device; 13 – wing; 14 – radio communication antennas; 15 – satellite navigation system receiver.

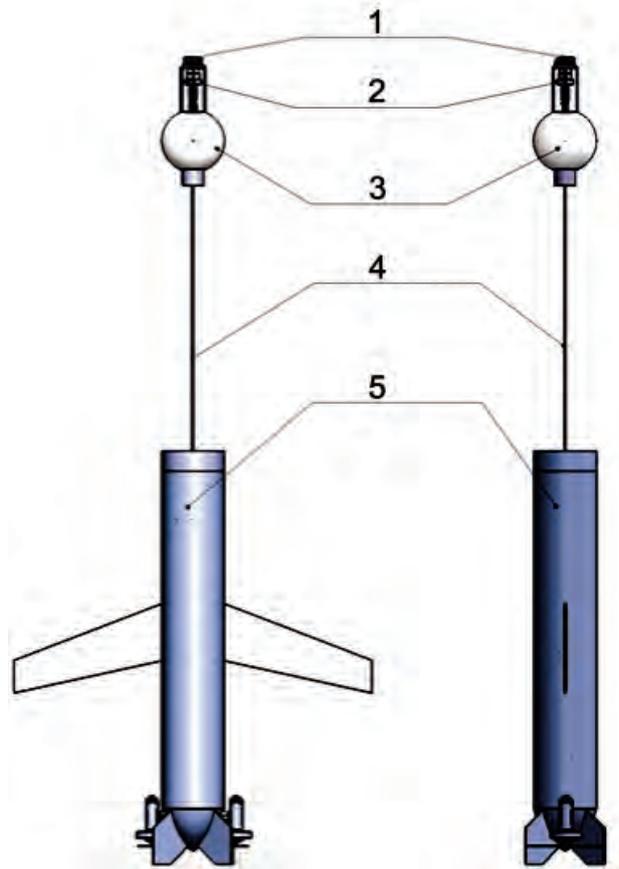


Fig. 4. The design of a hybrid UAV in receiving station mode: 1 – satellite navigation system receiver; 2 – radio communication antennas; 3 – pop-up VSR module; 4 – VSR communication cable; 5 – hybrid UAV.

Table 1. Approximate technical characteristics of a hybrid AUV

Specifications	Value
Weight in air, no more than, kg	100
Dimensions, no more than: length×width×height, m	2.3×1.7×0.4
Maximum working depth, m	500
Energy intensity of the energy supply system, W·h	2·10 ²⁴
Maximum speed in AUV mode, not less than, m/s	2.0
Autonomy in AUV mode at maximum speed, not less than, km	10
Vertical movement speed in receiving station mode, m/s	0.01–0.03
Maximum speed in glider mode, m/s	0.35
Autonomy in glider mode, not less than, months (total horizontal range – at least 1 500 km)	2

References

- National Security Strategy**, USA, Washington, The White House, 2015, 29 pp. (https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/docs/2015_national_security_strategy_2.pdf).
- Yu.A. Koryakin, S.A. Smirnov, G.V. Yakovlev** *Shipboard Hydroacoustic Equipment: Status and Current Problems [Korabelnaya gidroakusticheskaya tekhnika: sostoyanie i aktualnye problemy]*, RF, Saint Petersburg, Nauka, 2004, 410 pp. (in Russian).
- D. Gingrass** *J. Acoust. Soc. Am.*, 1989, **86**, 1940. DOI: 10.1109/MDSP.1989.97041.
- A.G. Sazontov, A.I. Malekhanov** *Acoustical Physics*, 2015, **61**(2), 213. DOI: 10.1134/S1063771015020128.
- V.M. Kuz'kin, S.A. Pereselkov** *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2023, **87**(5), 518. DOI: 10.3103/S1062873822701581.
- S.A. Pereselkov, V.M. Kuzkin** *Holographic Processing of Broadband Hydroacoustic Signals [Golograficheskaya obrabotka shirokopolosnykh gidroakusticheskikh signalov]*, RF, Voronezh, Voronezh State University Publ. House, 2023, 183 pp. (in Russian).
- Yu.V. Matvienko, V.V. Kostenko, V.A. Goy, Yu.A. Khvorostov** *Pat. RU*, 2664971, 2018 (in Russian).
- V.A. Gordienko** *Vector-Phase Methods in Acoustics [Vektorno-fazovye metody v akustike]*, RF, Moscow, Fizmatlit, 2007, 480 pp. (in Russian).
- M.I. Vashkevich, I.S. Azarov** *Digital Signal Processing [Tsifrovaya obrabotka signalov]*, 2020, №2, 13 (in Russian).
- L.M. Brekhovskikh, Yu.P. Lysanov** *Theoretical Foundations of Ocean Acoustics [Teoreticheskie osnovy akustiki okeana]*, USSR, Leningrad, Hydrometeorological Publ. House, 1982, 264 pp. (in Russian).
- Yu.A. Khvorostov, Yu.V. Matvienko, V.M. Kuz'kin, S.A. Pereselkov, S.A. Tkachenko** *Underwater Investigations and Robotics [Podvodnye issledovaniya i robototekhnika]*, 2022, №4(42), 84 (in Russian). DOI: 10.37102/1992-4429_2022_42_04_08.
- A.I. Belov, G.N. Kuznetsov** *Acoustical Physics*, 2014, **60**(2), 191. DOI: 10.1134/S1063771014010047.
- J. Bonnel, N.R. Chapman** *J. Acoust. Soc. Am.*, 2011, **130**, EL101. DOI: 10.1121/1.3611395.
- J.R. Apel, M. Badiey, C.-S. Chiu, S. Finette, R.H. Headrick, J. Kemp, J.F. Lynch, A.E. Newhall, M.H. Orr, B.H. Pasewark, D. Tielburger, A. Turgut, K. von der Heydt, S.N. Wolf** *IEEE J. Ocean. Eng.*, 1997, **22**, 465. DOI: 10.1109/48.611138.
- Yu.V. Matvienko, Yu.A. Khvorostov, A.V. Kamorny, M.Yu. Glushchenko, V.M. Kuz'kin, S.A. Pereselkov** *Underwater Research and Robotics [Podvodnye issledovaniya i robototekhnika]*, 2022, №3(41), 4 (in Russian). DOI: 10.37102/1992-4429_2022_41_03_01.

**«ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО ФОНДА
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ»
№ 1 (121) 2024 год**

Подписано в печать 17.05.2024.
Формат 60x90/8. Гарнитура Minion Pro.
Заказ № 3240. Тираж 300.

Отпечатано в типографии ООО «Принт».
426035, «г. Ижевск, ул. Тимирязева, 5.