



R U S S I A N

TECHNOLOGICAL JOURNAL

**РОССИЙСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

*Информационные системы.
Информатика.
Проблемы информационной безопасности*

*Роботизированные комплексы и системы.
Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля*

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

*Микро- и нанoeлектроника.
Физика конденсированного состояния*

Аналитическое приборостроение и технологии

Математическое моделирование

*Экономика наукоемких и высокотехнологичных
предприятий и производств. Управление в организационных системах*

Управление качеством продукции. Стандартизация

Мировоззренческие основы технологии и общества



RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

- Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности
 - Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля
 - Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
 - Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
 - Аналитическое приборостроение и технологии
 - Математическое моделирование
 - Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств. Управление в организационных системах
 - Управление качеством продукции. Стандартизация
 - Мировоззренческие основы технологии и общества
- Information systems. Computer sciences. Issues of information security
 - Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing
 - Modern radio engineering and telecommunication systems
 - Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics
 - Analytical instrument engineering and technology
 - Mathematical modeling
 - Economics of knowledge-intensive and high-tech enterprises and industries. Management in organizational systems
 - Product quality management. Standardization
 - Philosophical foundations of technology and society

Russian Technological Journal
2024, том 12, № 4

Russian Technological Journal
2024, Vol. 12, No. 4

Russian Technological Journal 2024, том 12, № 4

Дата опубликования 30 июля 2024 г.

Научно-технический рецензируемый журнал освещает вопросы комплексного развития радиотехнических, телекоммуникационных и информационных систем, электроники и информатики, а также результаты фундаментальных и прикладных междисциплинарных исследований, технологических и организационно-экономических разработок, направленных на развитие и совершенствование современной технологической базы.

Периодичность: один раз в два месяца.

Журнал основан в декабре 2013 года. До 2016 г. издавался под названием «Вестник МГТУ МИРЭА» (ISSN 2313-5026), а с января 2016 г. по июль 2021 г. под названием «Российский технологический журнал» (ISSN 2500-316X).

Учредитель и издатель:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» 119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и доктора наук, индексируется в РГБ, РИНЦ, eLibrary, Соционет, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD), Google Scholar, Ulrich's International Periodicals Directory.

Главный редактор:

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, президент ФГБОУ ВО МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Москва, Россия.
Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, sigov@mirea.ru.

Редакция:

Зав. редакцией к.т.н. Г.Д. Середина
Научный редактор д.т.н., проф. Г.В. Куликов
Выпускающий редактор А.С. Алексеенко
Технический редактор Д.В. Трофимова
119571, г. Москва, пр-т Вернадского, 86, оф. Л-119.
Тел.: +7 (499) 600-80-80 (#31288).
E-mail: seredina@mirea.ru.

Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации СМИ ПИ № ФС 77 - 81733 от 19.08.2021 г. СМИ зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Индекс по объединенному каталогу «Пресса России» 79641.

<https://www.rtlj-mirea.ru>

Russian Technological Journal 2024, Vol. 12, No. 4

Publication date July 30, 2024.

The peer-reviewed scientific and technical journal highlights the issues of complex development of radio engineering, telecommunication and information systems, electronics and informatics, as well as the results of fundamental and applied interdisciplinary researches, technological and economical developments aimed at the development and improvement of the modern technological base.

Periodicity: bimonthly.

The journal was founded in December 2013. The titles were «Herald of MSTU MIREA» until 2016 (ISSN 2313-5026) and «Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal» from January 2016 until July 2021 (ISSN 2500-316X).

Founder and Publisher:

Federal State Budget
Educational Institution of Higher Education
«MIREA – Russian Technological University»
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia.

The journal is included into the List of peer-reviewed science press of the State Commission for Academic Degrees and Titles of Russian Federation. The Journal is included in Russian State Library (RSL), Russian Science Citation Index, eLibrary, Socionet, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD), Google Scholar, Ulrich's International Periodicals Directory.

Editor-in-Chief:

Alexander S. Sigov, Academician at the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, President of MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, Russia.
Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, sigov@mirea.ru.

Editorial staff:

Managing Editor Cand. Sci. (Eng.) Galina D. Seredina
Scientific Editor Dr. Sci. (Eng.), Prof. Gennady V. Kulikov
Executive Editor Anna S. Alekseenko
Technical Editor Darya V. Trofimova
86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571 Russia.
Phone: +7 (499) 600-80-80 (#31288).
E-mail: seredina@mirea.ru.

The registration number ПИ № ФС 77 - 81733 was issued in August 19, 2021 by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media of Russia.

The subscription index of *Pressa Rossii*: 79641.

Редакционная коллегия

- Кудж
Станислав Алексеевич** д.т.н., профессор, ректор РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, <https://orcid.org/0000-0003-1407-2788>, rector@mirea.ru
- Банис
Юрас Йонович** хабилитированный доктор наук, профессор, проректор Вильнюсского университета, Вильнюс, Литва. Scopus Author ID 7003687871, juras.banys@ff.vu.lt
- Бетелин
Владимир Борисович** академик Российской академии наук (РАН), д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Федерального научного центра «Научно-исследовательский институт системных исследований» РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 6504159562, ResearcherID J-7375-2017, betelin@niisi.msk.ru
- Боков
Алексей Алексеевич** д.ф.-м.н., старший научный сотрудник, химический факультет и 4D LABS, Университет Саймона Фрейзера, Ванкувер, Британская Колумбия, Канада. Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, <http://orcid.org/0000-0003-1126-3378>, abokov@sfu.ca
- Вахрушев
Сергей Борисович** д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры Физической электроники СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия. Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, <http://orcid.org/0000-0003-4867-1404>, s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
- Гуляев
Юрий Васильевич** академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru
- Жуков
Дмитрий Олегович** д.т.н., профессор кафедры телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информатики РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru
- Кимель
Алексей Вольдемарович** к.ф.-м.н., профессор, Университет Радбауд, г. Наймеген, Нидерланды. Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl
- Крамаров
Сергей Олегович** д.ф.-м.н., профессор, Сургутский государственный университет, Сургут, Россия. Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>, mavoo@yandex.ru
- Новиков
Дмитрий Александрович** академик РАН, д.т.н., директор Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 7102213403, ResearcherID Q-9677-2019, <https://orcid.org/0000-0002-9314-3304>, novikov@ipu.ru
- Перно Филипп** Dr. Sci. (Electronics), профессор, Центральная Школа г. Лилль, Франция. Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
- Романов
Михаил Петрович** д.т.н., профессор, научный руководитель Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 14046079000, <https://orcid.org/0000-0003-3353-9945>, m_romanov@mirea.ru
- Савиных
Виктор Петрович** академик РАН, Дважды Герой Советского Союза, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии, Москва, Россия. Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru
- Соболевский
Андрей Николаевич** д.ф.-м.н., директор Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия. Scopus Author ID 7004013625, ResearcherID D-9361-2012, <http://orcid.org/0000-0002-3082-5113>, sobolevski@iitp.ru
- Сюй
Ли Да** академик Европейской академии наук, Российской инженерной академии и Инженерной академии Армении, Dr. Sci. (Systems Science), профессор, Университет Олд Доминион, Норфолк, Соединенные Штаты Америки. Scopus Author ID 13408889400, <https://orcid.org/0000-0002-5954-5115>, lxu@odu.edu
- Харин
Юрий Семенович** академик Национальной академии наук Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, директор НИИ прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь. Scopus Author ID 6603832008, <http://orcid.org/0000-0003-4226-2546>, kharin@bsu.by
- Чаплыгин
Юрий Александрович** академик РАН, д.т.н., профессор, член Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН, президент Института микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина НИУ «МИЭТ», Москва, Россия. Scopus Author ID 6603797878, ResearcherID B-3188-2016, president@miet.ru
- Шпак
Василий Викторович** к.э.н., зам. министра промышленности и торговли Российской Федерации, Министерство промышленности и торговли РФ, Москва, Россия; доцент, Институт микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина НИУ «МИЭТ», Москва, Россия, mishinevaiv@minprom.gov.ru

Editorial Board

- Stanislav A. Kudzh** Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of RTU MIREA, Moscow, Russia. Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, <https://orcid.org/0000-0003-1407-2788>, rector@mirea.ru
- Juras Banys** Habilitated Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector of Vilnius University, Vilnius, Lithuania. Scopus Author ID 7003687871, juras.banys@ff.vu.lt
- Vladimir B. Betelin** Academician at the Russian Academy of Sciences (RAS), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Supervisor of Scientific Research Institute for System Analysis, RAS, Moscow, Russia. Scopus Author ID 6504159562, ResearcherID J-7375-2017, betelin@niisi.msk.ru
- Alexei A. Bokov** Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Research Fellow, Department of Chemistry and 4D LABS, Simon Fraser University, Vancouver, British Columbia, Canada. Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, <http://orcid.org/0000-0003-1126-3378>, abokov@sfu.ca
- Sergey B. Vakhrushev** Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory of Neutron Research, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute of the RAS, Department of Physical Electronics of St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia. Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, <http://orcid.org/0000-0003-4867-1404>, s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
- Yury V. Gulyaev** Academician at the RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Academic Supervisor of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow, Russia. Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru
- Dmitry O. Zhukov** Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Informatics, RTU MIREA, Moscow, Russia. Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru
- Alexey V. Kimel** PhD (Phys.-Math.), Professor, Radboud University, Nijmegen, Netherlands, Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl
- Sergey O. Kramarov** Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Surgut State University, Surgut, Russia. Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>, mavoo@yandex.ru
- Dmitry A. Novikov** Academician at the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Director of V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Moscow, Russia. Scopus Author ID 7102213403, ResearcherID Q-9677-2019, <https://orcid.org/0000-0002-9314-3304>, novikov@ipu.ru
- Philippe Pernod** Dr. Sci. (Electronics), Professor, Dean of Research of Centrale Lille, Villeneuve-d'Ascq, France. Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
- Mikhail P. Romanov** Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academic Supervisor of the Institute of Artificial Intelligence, RTU MIREA, Moscow, Russia. Scopus Author ID 14046079000, <https://orcid.org/0000-0003-3353-9945>, m_romanov@mirea.ru
- Viktor P. Savinykh** Academician at the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia. Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru
- Andrei N. Sobolevski** Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Director of Institute for Information Transmission Problems (Kharkevich Institute), Moscow, Russia. Scopus Author ID 7004013625, ResearcherID D-9361-2012, <http://orcid.org/0000-0002-3082-5113>, sobolevski@iitp.ru
- Li Da Xu** Academician at the European Academy of Sciences, Russian Academy of Engineering (formerly, USSR Academy of Engineering), and Armenian Academy of Engineering, Dr. Sci. (Systems Science), Professor and Eminent Scholar in Information Technology and Decision Sciences, Old Dominion University, Norfolk, VA, the United States of America. Scopus Author ID 13408889400, <https://orcid.org/0000-0002-5954-5115>, lxu@odu.edu
- Yury S. Kharin** Academician at the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Director of the Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus. Scopus Author ID 6603832008, <http://orcid.org/0000-0003-4226-2546>, kharin@bsu.by
- Yuri A. Chaplygin** Academician at the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Member of the Departments of Nanotechnology and Information Technology of the RAS, President of the National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia. Scopus Author ID 6603797878, ResearcherID B-3188-2016, president@miet.ru
- Vasilii V. Shpak** Cand. Sci. (Econ.), Deputy Minister of Industry and Trade of the Russian Federation, Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation, Moscow, Russia; Associate Professor, National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia, mishinevaiv@minprom.gov.ru

Содержание

Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности

- 7** *А.С. Зувев, Д.А. Леонов*
Об управлении численностью одновременно функционирующих программных роботов различных видов
- 23** *Е.Ф. Певцов, Т.А. Деменкова, А.О. Индрищенко, В.В. Филимонов*
Выявление аппаратных уязвимостей цифровых устройств на основе систем сканирования и полунатурного моделирования

Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования неразрушающего контроля

- 40** *И.И. Давлюд*
Расчет основных эксплуатационных характеристик привязной высотной системы корабельного базирования
- 51** *А.А. Манушкин, Н.Н. Потрахов, А.В. Степанов, Е.Ю. Усачев*
Решение томографической задачи с использованием дихотомической схемы дискретизации в полярных координатах и парциальных системных матриц, инвариантных к вращениям

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

- 59** *М.С. Костин, К.А. Бойков*
Цифровые технологии сигнального радиовидения и радиомониторинга
- 70** *А.В. Ксендзук, В.Ф. Фатеев*
Принципы построения бортовых радиолокационных систем наноспутников, основанных на приеме отраженных сигналов спутниковых навигационных систем
- 84** *В.З. Нгуен*
Исследование влияния корректирующих кодов на когерентный прием сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при наличии шумовой и гармонической помех

Микро- и наноэлектроника. Физика конденсированного состояния

- 96** *А.А. Гуськов, Н.В. Безвиконный, С.Д. Лавров*
Конфигурация Кречмана как метод увеличения оптического поглощения в двумерных графеноподобных полупроводниках

Математическое моделирование

- 106** *Б. Пашишов, Д.А. Петрусевич*
Анализ нейросетевых моделей для прогнозирования временных рядов

Contents

Information systems. Computer sciences. Issues of information security

- 7** *Andrey S. Zuev, Dmitrii A. Leonov*
About managing the number of simultaneously functioning software robots of different types
- 23** *Evgeniy F. Pevtsov, Tatyana A. Demenkova, Alexander O. Indrishenok, Vladimir V. Filimonov*
Identification of digital device hardware vulnerabilities based on scanning systems and semi-natural modeling

Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing

- 40** *Igor I. Dawlyud*
Calculation of the main operational characteristics of a tethered high-altitude ship-based system
- 51** *Alexey A. Manushkin, Nikolay N. Potrachov, Alexander V. Stepanov, Evgeny Yu. Usachev*
Tomographic task solution using a dichotomous discretization scheme in polar coordinates and partial system matrices invariant to rotations

Modern radio engineering and telecommunication systems

- 59** *Mihail S. Kostin, Konstantin A. Boikov*
Digital technologies for signal radio vision and radio monitoring
- 70** *Alexander V. Ksendzuk, Vyacheslav F. Fateev*
Principles of construction of nanosatellite radar systems based on global navigation satellite system reflectometry
- 84** *Van D. Nguyen*
Studying the influence of correction codes on coherent reception of M-PSK signals in the presence of noise and harmonic interference

Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

- 96** *Andrey A. Guskov, Nikita V. Bezikonnyi, Sergey D. Lavrov*
Kretschmann configuration as a method to enhance optical absorption in two-dimensional graphene-like semiconductors

Mathematical modeling

- 106** *Bakhtierzhon Pashshoev, Denis A. Petrusevich*
Neural network analysis in time series forecasting

УДК 007.52, 519.673, 519.687.1, 519.687.2, 519.852
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-7-22>
EDN BUECFJ



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Об управлении численностью одновременно функционирующих программных роботов различных видов

А.С. Зуев[@],
Д.А. Леонов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[@] Автор для переписки, e-mail: zuev_a@mirea.ru

Резюме

Цели. Изложение постановки, обоснование актуальности и предложение методов решения задачи управления численностью одновременно функционирующих программных роботов различных видов в условиях ограниченности вычислительных ресурсов и изменений состава совокупностей задач, поступающих на выполнение.

Методы. Задачу предложено решать, применяя модели и методы сценарного управления, линейного программирования, управления запасами, массового обслуживания и машинного обучения, соответствующие различным составам и предпосылкам формирования исходных данных, а также обеспечивающие различные горизонты актуальности получаемых решений.

Результаты. В целях формирования исходных данных задачи авторами предложен подход к определению состава и параметров вычислительных ресурсов, требующихся для функционирования одного программного робота, основанный на анализе состава используемого им программного обеспечения и информационных сервисов. Для случаев применения методов сценарного управления и линейного программирования составлены постановки и математические модели соответствующих задач, а на основе последовательностей их решения предложены метод оперативного управления численностью программных роботов и метод последовательной локальной оптимизации их численности. Предложен основанный на обработке результатов применения метода последовательной локальной оптимизации способ формирования статистических данных, позволяющих идентифицировать дефицитные и недефицитные вычислительные ресурсы. Изложены некоторые результаты применения программных роботов, разрабатываемых на платформе «Атом.РИТА», в интересах многофункционального центра РТУ МИРЭА.

Выводы. Сформулирована и формализована для случаев применения методов сценарного управления и математического аппарата линейного программирования новая и актуальная в сфере автоматизации бизнес-процессов организаций задача управления численностью одновременно функционирующих программных роботов различных видов. Решение данной задачи с применением различных математических методов открывает перспективы расширения функциональных возможностей платформ программной роботизации, а также повышения экономической эффективности их применения и формирования дополнительных конкурентных преимуществ посредством оптимизации использования компонентов ИТ-инфраструктуры.

Ключевые слова: программный робот, цифровой сотрудник, robotic process automation, автоматизация бизнес-процессов, программная роботизация

• Поступила: 23.04.2024 • Доработана: 27.05.2024 • Принята к опубликованию: 29.05.2024

Для цитирования: Зувев А.С., Леонов Д.А. Об управлении численностью одновременно функционирующих программных роботов различных видов. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):7–22. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-7-22>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

About managing the number of simultaneously functioning software robots of different types

Andrey S. Zuev [@],
Dmitrii A. Leonov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
[@] Corresponding author, e-mail: zuev_a@mirea.ru

Abstract

Objectives. The study sets out to justify the relevance and investigate approaches for solving the problem of managing the number of simultaneously functioning software robots of various types under conditions of limited computational resources and changes in sets of executable tasks.

Methods. A proposed solution is based on models and methods of scenario management, linear programming, inventory management, queuing theory, and machine learning. The described methods are valid for different compositions and preconditions for generating initial data, as well as ensuring the relevance horizons of the obtained solutions.

Results. The initial data is obtained via the presented approach for determining the computational resource parameters for operating a single software robot. The resources are determined by analyzing the composition of the software and information services used by an actual software robot. Problem statements and mathematical models are developed for cases involving scenario management and linear programming methods. Methods for real-time management of the number of software robots and their sequential local optimization are proposed based on the abovementioned solution sequences. The developed method for generating statistical data based the results of applying the sequential local optimization method is used to identify deficient and non-deficient computational resources. Some results of working in the multi-functional center of RTU MIREA software robots developed on the Atom.RITA platform are outlined.

Conclusions. The emerging problem of managing the number of simultaneously operating software robots of various types for cases involving scenario control methods and linear programming is formalized. This problem is relevant in the field of automation of business processes of organizations. The use of mathematical methods for solving this problem opens up opportunities for expanding the functional capabilities of robotic process automation platforms, as well as increasing their economic efficiency to create competitive advantages by optimizing the use of IT infrastructure components.

Keywords: software robot, digital employee, robotic process automation, business process automation, software robotization

• Submitted: 23.04.2024 • Revised: 27.05.2024 • Accepted: 29.05.2024

For citation: Zuev A.S., Leonov D.A. About managing the number of simultaneously functioning software robots of different types. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):7–22. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-7-22>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация бизнес-процессов в контексте делегирования типовых, повторяющихся, рутинных и не требующих аналитики задач и действий от сотрудников специализированным сервисам за последние 10 лет является одним из основных источников повышения эффективности функционирования юридических лиц, государственных и коммерческих структур [1–3] (далее – организаций). В качестве инструментов автоматизации бизнес-процессов могут выступать различные предметно-ориентированные информационные системы [4, 5], например, системы электронного документооборота, управления персоналом, складской логистики, бухгалтерского учета, взаимодействия с целевой аудиторией и клиентами, управления проектами, аналитические и интеллектуальные системы и т.п. Вместе с тем применение в бизнес-процессах организаций прикладного программного обеспечения (ПО), относящегося к любым классам и видам¹, предполагает наличие соответствующего персонала, использующего данное ПО для выполнения бизнес-задач, входящих в состав назначенных ему бизнес-функций, в соответствии с заданными бизнес-ролями (должностями) [6]. В настоящей статье под бизнес-задачей понимается типовая последовательность действий сотрудника с совокупностью программных средств, приводящая к получению заданного результата на основании изменяющегося состава исходных данных, – типовой сценарий использования совокупности программных средств, допускающий полную алгоритмизацию.

Логичным и инновационным направлением развития автоматизации бизнес-процессов выступили

¹ О внесении изменений в классификатор программ для электронных вычислительных машин и баз данных, утвержденный приказом Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации от 22 сентября 2020 г. № 486. Приказ Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации от 22 декабря 2022 г. № 974. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202304200009>. Дата обращения 22.03.2024. [On Amending the Classifier of Programs for Electronic Computing Machines and Databases Approved by Order of the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation No. 486 of September 22, 2020. Order of the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation No. 974 dated December 22, 2022. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202304200009> (in Russ.). Accessed March 22, 2024.]

системы их программной роботизации (robotic process automation, RPA) [7, 8] – ПО, реализующее технологии разработки и применения программных роботов (ПР), специальных приложений, сценарии функционирования которых воспроизводят типовые последовательности действий сотрудников с сочетаниями программных средств². С 4 декабря 2023 г. системы роботизации процессов юридически закреплены приказом Минцифры России³.

Важной особенностью RPA является то, что ПР, в соответствии с заложенными сценариями (алгоритмами) функционирования, могут работать с совокупностями информационных систем и сервисов, не имеющих предусмотренных средств интеграции и интероперабельности [9]. В настоящее время на международном⁴ и отечественном⁵ рынках ПО

² Об утверждении классификатора программ для электронных вычислительных машин и баз данных. Приказ Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации от 22 сентября 2020 г. № 486. <https://digital.gov.ru/ru/documents/7362/>. Дата обращения 26.03.2024. [On Approval of the Classifier of Programs for Electronic Computing Machines and Databases. Order of the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation No. 486 dated September 22, 2020. <https://digital.gov.ru/ru/documents/7362/> (in Russ.). Accessed March 26, 2024.]

³ О внесении изменений в классификатор программ для электронных вычислительных машин и баз данных, утвержденный приказом Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации от 22 сентября 2020 г. № 486. Приказ Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации от 04 декабря 2023 г. № 1041. <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202403110026>. Дата обращения 26.03.2024. [On Amending the Classifier of Programs for Electronic Computing Machines and Databases Approved by Order of the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation No. 486 dated September 22, 2020. Order of the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation No. 1041 dated December 04, 2023. <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202403110026> (in Russ.). Accessed March 26, 2024.]

⁴ Top-31 best robotic process automation software on the market. <https://www.zaptest.com/rpa-tools-top-31-best-robotic-process-automation-software-on-the-market>. Дата обращения 22.03.2024. / Accessed March 22, 2024.

⁵ Российский рынок RPA-систем. Tadviser 08.11.2022. https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Российский_рынок_RPA-систем. Дата обращения 22.03.2024. [Russian market of RPA-systems. Tadviser November 8, 2022. https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Российский_рынок_RPA-систем (in Russ.). Accessed March 22, 2024.]

представлено несколько RPA-платформ, предоставляющих инструментарий разработки и управления функционированием ПР.

Программные роботы частично или полностью замещают сотрудников организации в ее бизнес-процессах в части выполнения типовых бизнес-задач, т.е. выступают в роли «цифровых сотрудников», функционирующих в соответствии с конкретной бизнес-ролью, которая классически предусматривается в штатном расписании персонала [10], или являются «цифровыми ассистентами» реальных сотрудников [11]. Преимущества «цифрового» сотрудника для организации очевидны [12, 13] – график работы «24/7/365», отсутствие требований к условиям труда и расходов на его оплату, исключение процедур рекрутинга, обучения, контроля работы, «текучки» кадров и т.д.

Бизнес-задачи, подлежащие программной роботизации, будем называть программно-роботизируемыми задачами (ПРЗ, robotic automation task, RAT). Будем считать, что между ПРЗ и выполняющими их ПР (исполняемыми сценариями действий) установлено взаимно-однозначное соответствие – каждый ПР соответствует отдельной ПРЗ. На основании результатов выполнения сценария реализации ПР конкретной бизнес-задачи каждый ее экземпляр либо считается успешно завершенным (что должно соответствовать подавляющему большинству случаев), либо добавляется в список инцидентов, требующих дополнительного рассмотрения сотрудником, в т.ч. при некорректном завершении сценария функционирования ПР. Одним из преимуществ использования ПР является простота масштабирования их применения при изменении интенсивности бизнес-задач, под которой далее будет пониматься количество их повторов, экземпляров, требующих выполнения за некоторый заданный период времени. Необходимые показатели эффективности выполнения бизнес-процессов могут быть обеспечены в результате увеличения или уменьшения количества одновременно функционирующих ПР, соответствующих данным бизнес-процессам. В результате в условиях одновременного применения совокупности видов ПР, каждый из которых может быть тиражирован в различном количестве, приобретают актуальность задачи управления численностью одновременно функционирующих ПР различных видов в условиях ограниченности выделенных для их применения вычислительных ресурсов и соблюдения требующихся показателей эффективности выполнения соответствующих бизнес-процессов организации.

1. ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ЧИСЛЕННОСТЬЮ ПР

Являясь прикладным ПО и выполняясь в виде процессов в операционной системе, ПР потребляют

вычислительные ресурсы, объемы которых целесообразно считать не только ограниченными, но и подлежащими оптимизации. Соответствующие задачи актуальны как для отдельных организаций, применяющих ПР, в контексте минимизации затрат на их функционирование, так и для поставщиков облачных «фабрик» ПР [14, 15], – в контексте оптимизации затрат на содержание обеспечивающей их функционирование ИТ-инфраструктуры.

Решение обозначенных задач требует выработки, обоснования и реализации как архитектурных, так и инфраструктурных решений в ИТ-инфраструктуре организаций, применяющих ПР и/или поставляющих сервисы обеспечения их функционирования. Архитектурные решения могут рассматриваться, например, в контексте обеспечения информационной безопасности, в т.ч. при функционировании ПР на физических и виртуальных машинах в открытом и защищенном контурах [16, 17]. Инфраструктурные решения предполагают выделение физических и/или виртуальных машин с определенными параметрами и характеристиками, обеспечивающими вычислительные ресурсы, достаточные для функционирования некоторой совокупности ПР нескольких видов с соблюдением требующихся показателей эффективности выполнения соответствующих бизнес-процессов организации. Под вычислительными ресурсами могут пониматься:

- количество потоков центрального процессора (central processing unit, CPU);
- объем оперативной памяти (random-access memory, RAM);
- объем внутреннего накопителя данных (hard disk drive, HDD и/или solid-state drive, SSD);
- объем видеопамати и количество ядер графического процессора (graphics processing unit, GPU);
- количество одновременных терминальных сессий;
- пропускная способность канала проводной или беспроводной сети передачи данных и т.п.

Информационно-технологическая инфраструктура функционирования ПР является одним из ключевых параметров, предопределяющих эффективность их применения. При ее формировании необходимо учитывать, в т.ч. следующие аспекты:

- состав ПО и информационных сервисов, с которым взаимодействует ПР, определяется содержательной частью соответствующей ему бизнес-задачи и предопределяет требования к операционной среде его функционирования – к требующимся вычислительным ресурсам;
- одновременно может функционировать несколько ПР из некоторой совокупности их видов, при этом допустимые сочетания их численностей ограничены выделенными вычислительными ресурсами;

- при большом разнообразии видов ПР, а также в условиях реализации их «фабрик», множество применяемых ПР может быть декомпозировано на подмножества, соответствующие, например, отдельным бизнес-процессам и/или структурным подразделениям организации с выделением отдельных (независимых) объемов вычислительных ресурсов;
- изменения интенсивностей бизнес-задач, выполняемых ПР (количества их повторов, экземпляров, требующих выполнения за некоторый заданный период времени), обуславливают целесообразность варьирования численностей ПР соответствующих видов, при этом вычислительные ресурсы, выделенные для реализации всей их совокупности (множества видов и экземпляров каждого вида) являются ограниченными;
- требования к параметрам и характеристикам выполнения бизнес-процессов, включающих решаемые ПР бизнес-задачи, могут изменяться, что влияет соответственно на численности ПР и интенсивности задач.

Перечисленные выше аспекты реализации функционирования совокупностей ПР позволяют утверждать, что задача управления численностью одновременно функционирующих ПР различных видов в условиях ограниченности вычислительных ресурсов, изменения интенсивностей ПРЗ, а также варьирования требований к параметрам выполнения соответствующих бизнес-процессов, является актуальной и имеющей практическую значимость, относится к классу оптимизационных и допускает различные постановки, соответствующие различным предпосылкам формализации исходных данных, а, следовательно, может быть решена как в различных постановках, так и с применением различных математических аппаратов [18].

В составе различных RPA-платформ присутствует компонент управления функционированием ПР («мастер» или «оркестратор»), выполняющий функции их запуска и остановки (в т.ч. в соответствии с заданным расписанием), управления лицензиями, интеграцией, версионированием, логами, аналитикой, доступами и т.д. Динамическая оптимизация численности одновременно функционирующих ПР различных видов с учетом некоторого состава формализованных ограничений и требований может рассматриваться в качестве дополнительного функционала данного компонента управления, обеспечивающего расширение конкурентных преимуществ RPA-платформы за счет оптимизации использования компонентов ИТ-инфраструктуры для обеспечения функционирования ПР.

Сформулированная авторами задача может быть решена с применением различных подходов и методов, сравнение некоторых из которых приведено в табл. 1:

- сценарное управление – доступные варианты численностей ПР различных видов рассматриваются в качестве сценариев управления, из множества которых выбирается наиболее рациональный в условиях текущей интенсивности формирования множества бизнес-задач;
- математический аппарат линейного программирования – оптимальные численности ПР различных видов определяются на основании сформировавшихся за некоторый период времени совокупностей соответствующих бизнес-задач, подлежащих выполнению;
- модели управления запасами – основаны на формализации динамик поступления бизнес-задач на обработку и их выполнения ПР;

Таблица 1. Сравнение некоторых методов решения рассматриваемой задачи

Применяемый математический аппарат	Особенности применяемого математического аппарата	Период актуальности решения	Результат применения
Сценарный подход к управлению (изложено в настоящей статье)	Выполняется ситуационное реагирование на изменение интенсивностей бизнес-задач	Оперативный (сиюминутный)	Рационализация в соответствии с изменениями исходных данных
Модели машинного обучения	Предполагается итеративное дообучение нейронной сети	Оперативный (сиюминутный)	
Линейное программирование (изложено в настоящей статье)	В отдельных периодах времени выполняется ранее накопившаяся и формируется для выполнения новая совокупность бизнес-задач	Краткосрочный	Оптимизация в соответствии с результатом обработки накопленных исходных данных
Модели управления запасами	Предполагаются известными закономерности генерации бизнес-задач с ходом времени	Среднесрочный	
Модели массового обслуживания		Долгосрочный	

- модели массового обслуживания – закономерности изменения интенсивностей бизнес-задач с ходом времени предполагаются известными (заданными или формализованными в результате предварительно выполненного анализа), экземпляры ПР соответствующих видов рассматриваются как каналы системы массового обслуживания, допускающие варьирование их численностей с целью управления характеристиками рассматриваемой системы;
- модели машинного обучения – предполагают построение и/или обучение нейронных сетей с целью автоматизации принятия решений относительно численностей одновременно функционирующих ПР различных видов в соответствии с динамикой и/или прогнозами изменения значений некоторого состава формализованных ограничений и требований.

Различные методы решения рассматриваемой задачи предполагают наличие соответствующих им предпосылок относительно доступной структуры и результатов предварительной формализации

ее исходных данных, а также позволяют обеспечить различный горизонт автономности реализации получаемого решения без его корректировки.

Далее изложены постановки рассматриваемой задачи для случаев применения сценарного управления и математического аппарата линейного программирования. Описание ее постановок и формализаций с применением других, в т.ч. не перечисленных в табл. 1 математических аппаратов, будет являться одним из дальнейших направлений выполняемых авторами исследований.

2. ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СОСТАВА И ПАРАМЕТРОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ, ТРЕБУЮЩИХСЯ ПР

Первым этапом формирования исходных данных рассматриваемой задачи является определение состава и объема вычислительных ресурсов, требующихся для функционирования одного ПР каждого вида. Для этого может быть использована таблица, подобная табл. 2, позволяющая сформировать

Таблица 2. Определение требующихся ПР вычислительных ресурсов на основе состава используемого ими ПО

Вычислительный ресурс	Задействованное ПО	Требующийся ПО объем ресурса	Требующееся ПР количество экземпляров ПО			
			Робот № 1	Робот № 2	...	Робот № n
Объем RAM, Мб (ресурс № 1)	ПО № 1 (браузер)	O_{11}	3	0	...	1
	ПО № 2 (текстовый процессор)	O_{12}	1	2	...	0

	ПО № k (почта)	O_{1k}	1	1	...	1
Потребности ПР в ресурсе № 1		Значение	$3O_{11} + O_{12} + \dots + O_{1k}$	$2O_{12} + \dots + O_{1k}$...	$O_{11} + \dots + O_{1k}$
		Обозначение	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}
Количество потоков CPU (ресурс № 2)	ПО № 1 (браузер)	P_{21}	3	0	...	1
	ПО № 2 (текстовый процессор)	P_{22}	1	2	...	0

	ПО № k (почта)	P_{2k}	1	1	...	1
Потребности ПР в ресурсе № 2		Значение	$3P_{21} + P_{22} + \dots + P_{2k}$	$2P_{22} + \dots + P_{2k}$...	$P_{21} + \dots + P_{2k}$
		Обозначение	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}
...
Объем накопителя данных, Мб (ресурс № m)	ПО № 1 (браузер)	H_{m1}	3	0	...	1
	ПО № 2 (текстовый процессор)	H_{m2}	1	2	...	0

	ПО № k (почта)	H_{mk}	1	1	...	1
Потребности ПР в ресурсе № m		Значение	$3H_{m1} + H_{m2} + \dots + H_{mk}$	$2H_{m2} + \dots + H_{mk}$...	$H_{m1} + \dots + H_{mk}$
		Обозначение	a_{m1}	a_{m2}	...	a_{mn}

требующиеся данные в результате систематизации состава ПО и информационных сервисов, задействованных для выполнения соответствующих бизнес-задач. Такие вычислительные ресурсы аппаратного обеспечения как количество потоков CPU, объем RAM, количество ядер GPU, объем внутреннего накопителя данных, максимально доступное количество терминальных сессий, пропускную способность канала связи и т.п., можно считать ограниченными в составе выделенной для целей программной роботизации ИТ-инфраструктуры организации и аддитивными по всей совокупности одновременно функционирующих ПР.

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ДЛЯ СЛУЧАЯ ПРИМЕНЕНИЯ СЦЕНАРНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Применение сценарного управления целесообразно в случаях оперативного (моментального) варьирования численностей одновременно функционирующих ПР различных видов. В соответствии с одномоментным (текущим) изменением интенсивностей бизнес-задач (количества их экземпляров, поступивших на обработку в момент времени) может требоваться моментальное принятие решения о переходе к наиболее полно соответствующему данным условиям сочетанию численности одновременно функционирующих ПР различных видов. Возможны различные подходы к реализации сценарного управления численностями одновременно функционирующих ПР из некоторой совокупности их видов. В настоящей статье далее изложены два предлагаемых авторами подхода.

Предполагая, что один ПР вида j при выполнении соответствующей ему бизнес-задачи того же вида j потребляет a_{ij} вычислительного ресурса вида i , введем обозначения:

b_i – доступные (ограниченные) объемы вычислительных ресурсов видов $i = \overline{1, m}$, где m – их количество;
 x_j – количество одновременно функционирующих ПР видов $j = \overline{1, n}$, где n – их число;

c_j – производительность одного ПР вида j , равная количеству экземпляров бизнес-задачи данного вида j , выполняемых им за единичный период времени;

$e_j \geq 1$ – коэффициенты относительной приоритетности бизнес-задач соответствующих видов $j = \overline{1, n}$.

Будем называть сценариями $P_k = (x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn})$, где $k = \overline{1, p}$, варианты одновременного использования конкретных количеств x_{kj} , $j = \overline{1, n}$ ПР каждого из видов и рассматривать только допустимые к реализации на основании суммарных объемов требующихся вычислительных ресурсов сценарии.

Для определения состава допустимых сценариев, каждый из которых связан с максимальным использованием одного или нескольких выделенных

вычислительных ресурсов, можно воспользоваться вспомогательной таблицей, подобной табл. 3, структурирующей перебор сочетаний количеств одновременно функционирующих роботов каждого вида – при переходе к каждой последующей строке таблицы вычислительные ресурсы перераспределяются в пользу ПР с большим порядковым номером.

Таблица 3. Определение состава сценариев одновременного функционирования ПР с максимальным использованием одного или нескольких выделенных вычислительных ресурсов

Сценарии	Количество функционирующих роботов видов j							
	1	2	3	4	5	...	$n-1$	n
P_1	Q	0	0	0	0	...	0	0
P_2	$Q-1$	1	0	0	0	...	0	0
P_3	$Q-1$	0	2	0	0	...	0	0
P_4	$Q-1$	0	1	2	0	...	0	0
P_5	$Q-1$	0	1	1	1	...	0	0
P_6	$Q-1$	0	0	3	1	...	0	0
...
P_k	$Q-1$	0	0	0	0	...	0	r
P_{k+1}	$Q-2$	2	0	0	0	...	0	0
...
P_{p-1}	0	0	0	0	0	...	1	$R-1$
P_p	0	0	0	0	0	...	0	R

Предварительное формирование состава допустимых сценариев позволяет не выполнять их формирование при каждом решении рассматриваемой задачи, но определять рациональный (не излишний) состав функционирующих ПР посредством выбора сценария из содержащихся в сценарных таблицах, подобных табл. 3.

При составлении сценарных таблиц возможны 2 подхода:

1. Формирование полного состава сценариев, включающего сценарии с неполным использованием вычислительных ресурсов. Приводит к включению в сценарную таблицу результатов полного перебора возможных сочетаний ПР. Увеличивает вычислительную, но сокращает логическую сложность анализа содержания сценарной таблицы. Например, предлагаемые далее авторами формулы (4) и (7) могут применяться без проверки дополнительных соответствующих условий (5) и (8). Данный подход более целесообразен при небольших объемах выделенных вычислительных ресурсов и/или небольшом количестве видов ПР.
2. Формирование состава сценариев с максимальным использованием одного или нескольких

выделенных вычислительных ресурсов. Приводит к существенному сокращению количества записей в сценарной таблице, но обуславливает необходимость проверки возможностей сокращения количества одновременно функционирующих ПР. В связи с этим для предлагаемых далее авторами формул (4) и (7) будет необходима проверка дополнительных соответствующих условий (5) и (8). Данный подход более целесообразен при больших объемах выделенных вычислительных ресурсов и/или большом количестве видов ПР.

Эффективность рассмотренных выше подходов целесообразно исследовать для каждой конкретной задачи управления численностью одновременно функционирующих ПР. Предпочтительным будет являться подход, обеспечивающий наибольшую ожидаемую скорость решения соответствующей задачи, но каждый из подходов позволяет сформировать исходные данные для ее решения – для определения реализуемого сценария.

Реализуемый сценарий предопределяет количество бизнес-задач каждого вида, выполняемое соответствующей совокупностью ПР за единичный период времени. Смена реализуемого сценария приводит к изменению состава одновременно функционирующих ПР. Данные изменения могут быть один раз определены с помощью переходной таблицы, подобной табл. 4, для

Таблица 4. Пример переходной таблицы – изменения численностей функционирующих ПР при смене сценариев

Смена сценариев		Изменение численности функционирующих роботов видов j							
Исходный сценарий	Новый сценарий								
		1	2	3	4	5	...	$n-1$	n
P_1	P_1	0	0	0	0	0	...	0	0
P_1	P_2	-1	+1	0	0	0	...	0	0
P_1	P_3	-1	0	+2	0	0	...	0	0
P_1	P_4	-1	0	+1	+2	0	...	0	0
P_1	P_5	-1	0	+1	+1	+1	...	0	0
P_1	P_6	-1	0	0	+3	+1	...	0	0
...
P_1	P_k	-1	0	0	0	0	...	0	$+r$
P_1	P_{k+1}	-2	+2	0	0	0	...	0	0
...
P_1	P_p	$-Q$	0	0	0	0	...	0	$+R$
P_2	P_1	+1	-1	0	0	0	...	0	0
...
P_{p-1}	P_1	$+Q$	0	0	0	0	...	-1	$-R+1$
P_p	P_1	$+Q$	0	0	0	0	...	0	$-R$

всех возможных пар рассматриваемых допустимых сценариев из табл. 3 и в дальнейшем использоваться для автоматического выбора наиболее рационального сценария, к которому целесообразно перейти от текущего используемого в условиях наблюдаемого изменения интенсивности поступления бизнес-задач.

Обозначим наблюдающееся в результате смены сценария x на сценарий y изменение количества одновременно функционирующих ПР видов j через z_j^{xy} . Тогда T^{xy} (1) – вектор изменения численностей одновременно функционирующих ПР при переходе от сценария x на сценарий y :

$$T^{xy} = (z_1^{xy}, z_2^{xy}, \dots, z_n^{xy}). \quad (1)$$

Вектор соответствующих изменений в производительности выполнения бизнес-задач видов j может быть рассчитан по формуле:

$$U^{xy} = (c_1 z_1^{xy}, c_2 z_2^{xy}, \dots, c_n z_n^{xy}). \quad (2)$$

Первый предлагаемый подход к сценарному управлению функционированием ПР – сопоставление в единицу времени сценариев и совокупностей задач, поступающих на выполнение.

Будем считать, что за единичный период времени сформировалась ожидающая выполнения совокупность бизнес-задач видов j (с учетом их количеств, не выполненных на предыдущих этапах), описываемая вектором неотрицательных целочисленных компонентов F :

$$F = (f_1, f_2, \dots, f_n), \quad (3)$$

тогда сценарий G , который можно считать наиболее рациональным для реализации в следующий период времени, может быть определен на основании табл. 3 по формуле:

$$G = \min_{k=\overline{1,p}} G_k,$$

где $G_k = \sqrt{\sum_{j=1}^n e_j (f_j - c_j x_{kj})^2}$ или

$$G_k = \sum_{j=1}^n e_j |f_j - c_j x_{kj}|, \quad k = \overline{1, p}, \quad (4)$$

при этом, если $f_j - c_j x_{kj} \leq 0$, то соответствующее слагаемое j считается равным нулю, а количество x_{kj}^* роботов вида j , которое не требуется запускать, может быть определено по формуле:

$$x_{kj}^* = \lfloor c_j x_{kj} - f_j \rfloor. \quad (5)$$

Таблица 5. Исходные данные для рис. 1 ($e_j = 1, j = \overline{1, n}$)

Период времени	Совокупность задач для выполнения				Совокупность выполненных ПР задач				Значение по формуле (4)
	f_1	f_2	f_3	Точка	c_1x_{k1}	c_2x_{k2}	c_3x_{k3}	Точка	
1	2	2	3	B(2; 2; 3)	2	1	2	D(2; 1; 2)	$\sqrt{2}$ или 2
2	3	2 + 1	1 + 1	C(5; 4; 4)	2	2	0	G(4; 3; 2)	$2\sqrt{2}$ или 4
3	1 + 1	3 + 1	2 + 2	A(6; 7; 6)	2	4	2	Z(6; 7; 4)	2 или 2

Второй предлагаемый подход к сценарному управлению функционированием ПР – сопоставление в единицу времени результатов смены сценариев и изменений в составах совокупностей подлежащих выполнению задач.

Будем считать, что за единичный период времени реализации некоторого сценария t изменения численностей подлежащих выполнению бизнес-задач видов j (с учетом их количеств, не выполненных на предыдущих этапах) описываются вектором неотрицательных целочисленных компонентов F^* :

$$F^* = (f_1, f_2, \dots, f_n), \quad (6)$$

тогда сценарий G , который можно считать наиболее рациональным для перехода к реализации, может быть определен на основании табл. 4 по формуле:

$$G = \min_{k=1, p} G_k,$$

где $G_k = \sqrt{\sum_{j=1}^n e_j (f_j - c_j z_j^{tk})^2}$ или

$$G_k = \sum_{j=1}^n e_j |f_j - c_j z_j^{tk}|, \quad k = \overline{1, p}, \quad (7)$$

при этом, если $f_j - c_j z_j^{tk} \leq 0$, то соответствующее слагаемое j считается равным нулю, а количество x_{kj}^{**} роботов вида j , которое не требуется запускать, может быть определено по формуле:

$$x_{kj}^{**} = \lfloor c_j z_j^{tk} - f_j \rfloor. \quad (8)$$

Обобщение предложенных подходов. Формулы (4) и (7) в части расчета значений G_k составлены для метрик Евклида и Минковского и позволяют выбрать вектор G наименьшей длины среди всех векторов, являющихся результатом вычитания вектора производительности или изменения производительности выполнения бизнес-задач видов j из вектора ожидающих выполнения бизнес-задач или вектора изменений численности ожидающих выполнения бизнес-задач.

Вектор G позволяет определить сценарий k , который наиболее рационально применять или к которому наиболее рационально перейти от сценария

t в соответствии с текущей интенсивностью бизнес-задач в момент времени. То есть управление численностью одновременно функционирующих ПР видов j сводится к максимально возможному повторению динамики интенсивности или динамики изменения интенсивности бизнес-задач с задержкой на один единичный интервал времени. Условная иллюстрация представлена на рис. 1. Осям f_1, f_2 и f_3 соответствуют три вида бизнес-задач и соответствующих ПР, исходные данные приведены в табл. 5.

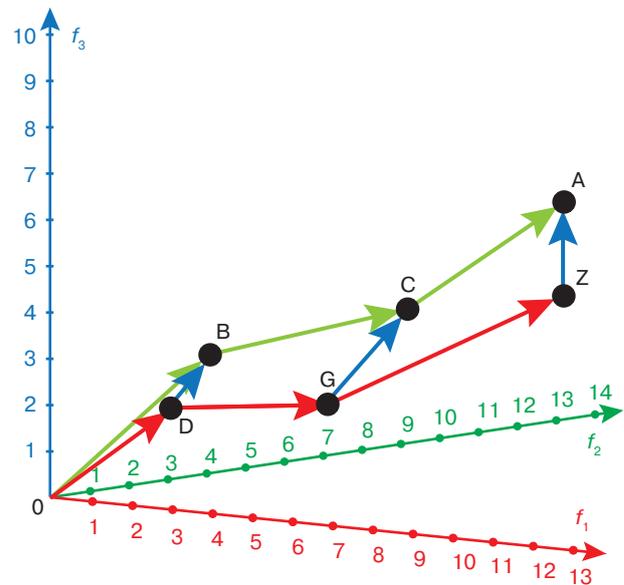


Рис. 1. Примеры векторов, иллюстрирующие применение формул (4) и (7)

Таким образом, авторами предложен не требующий решения оптимизационных задач метод оперативного управления численностью функционирующих ПР из некоторой совокупности их видов в условиях ограниченности выделенных вычислительных ресурсов и динамического изменения состава требующих выполнения бизнес-задач.

4. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ДЛЯ СЛУЧАЯ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Применение математического аппарата целочисленного линейного программирования целесообразно в тех случаях, когда содержание

бизнес-процессов допускает в краткосрочных (единичных) периодах времени выполнение ранее накопившихся и параллельное формирование подлежащих выполнению совокупностей бизнес-задач. То есть на каждом малом интервале времени не только формируется совокупность подлежащих выполнению бизнес-задач, требующая оптимизации численности ПР соответствующих видов для следующего интервала времени, но и функционирует совокупность ПР, оптимизированная в соответствии с совокупностью задач, сформированной в предыдущем интервале времени.

Исходные данные:

n – количество видов ПР и соответствующее им количество видов выполняемых бизнес-задач;

m – количество видов ограниченных вычислительных ресурсов;

P_j – обозначения (названия) видов ПР, $j = \overline{1, n}$;

Z_j – обозначения (названия) видов бизнес-задач, $j = \overline{1, n}$;

c_j – производительность одного ПР вида P_j , равная количеству экземпляров бизнес-задачи соответствующего вида Z_j , выполняемых ими за единичный период времени;

d_j – количество экземпляров бизнес-задачи соответствующего вида Z_j , подлежащее выполнению на момент решения оптимизационной задачи;

e_j – фиксированные коэффициенты относительной приоритетности бизнес-задач соответствующих видов Z_j ;

f_j – варьируемые коэффициенты относительной приоритетности бизнес-задач соответствующих видов Z_j , определяемые перед решением оптимизационной задачи на основании значений d_j различными способами, например, по формуле:

$$f_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}, j = \overline{1, n}, \quad (9)$$

в настоящей статье эти способы подробно рассматриваться не будут;

x_j – количество одновременно функционирующих роботов вида P_j ;

S_i – наименования видов ограниченных вычислительных ресурсов, $i = \overline{1, m}$;

b_i – доступный (ограниченный) объем вычислительного ресурса вида S_i ;

a_{ij} – потребление вычислительного ресурса вида S_i при функционировании одного ПР вида P_j , где $i = \overline{1, m}$ и $j = \overline{1, n}$.

Постановка задачи: требуется определить такое сочетание значений $x_j, j = \overline{1, n}$ (план функционирования ПР видов P_j), при котором количество вы-

полненных экземпляров соответствующих бизнес-задач Z_j будет максимальным с учетом коэффициентов их приоритетности e_j и f_j , потребляемые объемы вычислительных ресурсов каждого из видов $S_i, i = \overline{1, m}$, не превысят соответствующие ограничения b_i , а численность выполненных экземпляров бизнес-задач всех видов P_j не превысит их количества d_j , подлежащие выполнению на момент решения оптимизационной задачи.

Примечание: в соответствии с различными условиями постановки и предпосылками решения данной задачи в составе целевой функции могут учитываться любые варианты комбинирования наличия коэффициентов e_j и $f_j, j = \overline{1, n}$ (10).

Математическая модель задачи содержит:

- целевую функцию, максимизирующую суммарное количество выполненных экземпляров бизнес-задач $Z_j, j = \overline{1, n}$, с учетом коэффициентов их приоритетности e_j и f_j , а также производительностей ПР видов P_j ;
- систему ограничений, учитывающую: ограниченность b_i вычислительных ресурсов видов $S_i, i = \overline{1, m}$, сформировавшуюся на момент решения оптимизационной задачи совокупность d_j подлежащих выполнению бизнес-задач видов $Z_j, j = \overline{1, n}$, требования неотрицательности и целочисленности значений переменных x_j , являющиеся следствием того, что они соответствуют количествам одновременно функционирующих ПР видов P_j ;

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i, i = \overline{1, m}, \\ c_j x_j \leq d_j, j = \overline{1, n}, \\ x_j \geq 0, j = \overline{1, n}, \\ x_j - \text{целые}, j = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (10)$$

$$F = \sum_{j=1}^n c_j e_j f_j x_j \rightarrow \max.$$

В систему ограничений рассматриваемой задачи могут включаться и дополнительные условия, описывающие, например, ограничение на суммарное количество одновременно функционирующих ПР (одновременное количество терминальных сессий):

$$\sum_{j=1}^n x_j \leq X.$$

В рамках изложенной выше постановки задачи (10) период функционирования совокупности ПР разделяется на единичные отрезки

времени, в пределах каждого из которых происходит накопление подлежащей выполнению совокупности бизнес-задач, получение решения оптимизационной задачи, которое будет реализовываться в течение следующего отрезка времени, и непосредственная реализация решения оптимизационной задачи, полученного на предыдущем отрезке времени. Численности бизнес-задач, не принятые к выполнению ПР по результатам решения оптимизационной задачи, могут быть определены по формуле:

$$g_j = d_j - c_j x_j, j = \overline{1, n}. \quad (11)$$

Значения $g_j, j = \overline{1, n}$ добавляются к совокупности бизнес-задач, подлежащих выполнению в следующем единичном периоде времени, а возрастание их значений при последовательном решении рассматриваемой оптимизационной задачи сигнализирует о недостаточности вычислительных ресурсов, выделенных для функционирования ПР. Продолжительность T рассматриваемого единичного периода времени может определяться динамически, например, в результате контроля максимально допустимой накопленной численности экземпляров W_j бизнес-задач $P_j, j = \overline{1, n}$. В таком случае значения c_j целесообразно корректировать, например, по следующей формуле, с учетом констант t_j – продолжительностей выполнения ПР P_j одной задачи вида Z_j :

$$c_j = \left\lfloor \frac{T}{t_j} \right\rfloor, j = \overline{1, n}. \quad (12)$$

Результаты многократного решения рассмотренной оптимизационной задачи позволяют сформировать исходные данные для анализа использования выделенных вычислительных ресурсов. Пусть решено и упорядочено в хронологическом порядке множество задач $V, |V| = k$, для оптимальных решений $\mathbf{x}(x_1^p, x_2^p, \dots, x_n^p), p = \overline{1, k}$ которых по следующей формуле могут быть сформированы временные ряды значений неполного использования вычислительных ресурсов видов S_i :

$$S_i^p = b_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j^p, i = \overline{1, m}, p = \overline{1, k}. \quad (13)$$

Каждый набор значений $S_i^p, p = \overline{1, k}$ может быть исследован с применением методов анализа временных рядов и характеристик случайных величин с целью идентификации дефицитных, требующих увеличения, и недефицитных, допускающих сокращение, вычислительных ресурсов. Данному направлению исследований будут посвящены следующие работы авторов.

Таким образом, авторами предложен основанный на решении задач целочисленного линейного программирования метод последовательной локальной оптимизации численности одновременно функционирующих ПР из некоторой совокупности их видов в условиях ограниченности выделенных вычислительных ресурсов и формирования совокупностей поступающих на выполнение бизнес-задач. Также предложен основанный на обработке результатов применения метода последовательной локальной оптимизации способ формирования статистических данных, позволяющих идентифицировать дефицитные и недефицитные вычислительные ресурсы посредством применения известных методов анализа временных рядов и характеристик случайных величин.

5. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПР В РТУ МИРЭА

Институт информационных технологий (ИИТ) МИРЭА – Российского технологического университета (РТУ МИРЭА) использует в учебном процессе, в соответствии с заключенными соглашениями о сотрудничестве и лицензионными договорами, платформы программной роботизации Атом.РИТА⁶ (АО «Гринатом»⁷) и ROBIN (ООО «Робин»⁸). В рамках развития взаимодействия с Госкорпорацией «Росатом»⁹ и проекта «Цифровой университет»¹⁰ ИИТ РТУ МИРЭА с ноября 2023 г. начал реализовывать проект «Роботизация многофункционального центра» по применению RPA-платформы Атом.РИТА для разработки, внедрения и администрирования ПР в бизнес-процессах многофункционального центра РТУ МИРЭА:

- объектом исследования выступает многофункциональный центр – структурное подразделение в составе Управления по воспитательной и социальной работе, оказывающее студентам услуги по вопросам стипендий, проживания в общежитии, получения всех видов справок и другим вопросам;
- предметом исследования являются выполняемые многофункциональным центром бизнес-процессы, допускающие возможность программной роботизации их выполнения;
- субъект исследования представлен проектной группой сотрудников многофункционального центра и ИИТ;

⁶ <https://greenatom.ru/atom-rita/> (in Russ.). Дата обращения 17.06.2024. / Accessed June 17, 2024.

⁷ <https://greenatom.ru/> (in Russ.). Дата обращения 17.06.2024. / Accessed June 17, 2024.

⁸ <https://rpa-robin.ru/> (in Russ.). Дата обращения 17.06.2024. / Accessed June 17, 2024.

⁹ <https://www.rosatom.ru/index.html> (in Russ.). Дата обращения 17.06.2024. / Accessed June 17, 2024.

¹⁰ <https://minobrnauki.gov.ru/upload/iblock/e16/dv6edzmr0og5dm57dtm0wyllr6uwtujw.pdf> (in Russ.). Дата обращения 17.06.2024. / Accessed June 17, 2024.

- целью исследования является сокращение трудоемкости выполнения бизнес-процессов многофункционального центра посредством выделения в их составе бизнес-задач, допускающих выполнение посредством ПР.

Состав исследуемых бизнес-процессов и соответствующих бизнес-задач представлен в табл. 6.

Таблица 6. Исследуемые бизнес-процессы и бизнес-задачи

Бизнес-процесс	Бизнес-задачи (ПР)
Обработка заявок, поступивших от обучающихся	<ol style="list-style-type: none"> 1. Исполнение заявок о каникулах после государственной итоговой аттестации. 2. Исполнение заявок на оформление справки о доходах. 3. Исполнение заявок на оформление справки с места учебы. 4. Исполнение заявок на оформление справки о проживании в общежитии. 5. Перевод заявок в архив и удаление справок сроком более 1 месяца.
Передача данных об обучающихся в ГУП «Московский социальный регистр»	<ol style="list-style-type: none"> 1. Сбор согласий на передачу данных в ГУП «Московский социальный регистр». 2. Передача данных в ГУП «Московский социальный регистр». 3. Прием и обработка заявления об изготовлении стипендиальной карты.
Информирование обучающихся	<ol style="list-style-type: none"> 1. Рассылка подписанных справок с места учебы. 2. Рассылка оповещений студентам о просроченных паспортах.

В табл. 7 представлены сценарии функционирования некоторых из ПР, перечисленных в табл. 6.

В табл. 8 представлен расчет вычислительных ресурсов, необходимых рассматриваемым ПР для выполнения соответствующих бизнес-задач с использованием ПО и информационных сервисов:

- робот 1 – исполнение заявок на оформление справки с места учебы;
- робот 2 – исполнение заявок на оформление справки о доходах;
- робот 3 – рассылка оповещений студентам о просроченных паспортах.

Отличия в формировании содержания табл. 8 от табл. 2 иллюстрируют тот факт, что потребляемый ПР объем вычислительного ресурса (например, RAM) может определяться не только фактом параллельного использования некоторого количества версий какого-либо программного продукта или информационного сервиса, но и объемом обрабатываемой в них информации – открытыми файлами, вкладками и т.п.

С 10 января 2024 г. в многофункциональном центре РТУ МИРЭА функционирует ПР, изготавливающий справки об обучении в образовательной

Таблица 7. Общие сценарии функционирования некоторых из рассматриваемых ПР

Программные роботы	Сценарий функционирования
Исполнение заявок на оформление справки о доходах	<ol style="list-style-type: none"> 1. Вход в личный кабинет сотрудника РТУ МИРЭА. 2. Переход в раздел «Заявления», выбор соответствующего типа заявления. 3. Обработка данных из заявки. 4. Классификация заявок на обрабатываемые и отказываемые. 5. Выгрузка заявок в виде файлов Excel. 6. Смена статуса для каждой выгруженной заявки в ее файле Excel. 7. Рассылка файлов Excel по отделам бухгалтерии.
Исполнение заявок на оформление справки с места учебы	<ol style="list-style-type: none"> 1. Вход в личный кабинет сотрудника РТУ МИРЭА. 2. Переход в раздел «Заявления», выбор соответствующего типа заявления. 3. Обработка данных из заявки. 4. Осуществление входа в информационную систему «Тандем.Университет». 5. Классификация заявок на обрабатываемые и отказываемые. 6. Выгрузка файла Word со справкой. 7. Осуществление входа в облако РТУ МИРЭА. 8. Выгрузка файла справки в облако РТУ МИРЭА.
Рассылка подписанных справок с места учебы	<ol style="list-style-type: none"> 1. Вход в личный кабинет сотрудника РТУ МИРЭА. 2. Переход в раздел «Заявления», выбор соответствующего типа заявления. 3. Осуществление входа в облако РТУ МИРЭА. 4. Формирование ссылки на файл с подписанной справкой. 5. Прикрепление ссылки на файл к соответствующей заявке и ее закрытие.
Рассылка оповещений студентам о просроченных паспортах	<ol style="list-style-type: none"> 1. Вход в «Тандем.Университет». 2. Заполнение формы отчета в «Тандем.Университет». 3. Выгрузка и обработка файла Excel с данными об обучающихся. 4. Вход в личный кабинет сотрудника РТУ МИРЭА. 5. Переход в раздел «Панель управления объявлениями». 6. Формирование публикации с оповещением о просроченных паспортах с отправкой по списку из сформированного ранее файла Excel. 7. Почтовая рассылка по адресатам из публикации с оповещением.

организации (справки с места учебы) на основании электронных заявок в личном кабинете студента. По состоянию на 10.07.2024 г. робот успешно обработал более 46800 заявок, выдав более 45700 справок. Время выполнения одной заявки

Таблица 8. Расчет вычислительных мощностей, требующихся некоторым ПР, используемым в многофункциональном центре РТУ МИРЭА

Вычислительный ресурс	Задействованное ПО	Требующийся ПО объем ресурс	Требующиеся ПР объемы ресурсов			Итоговая потребность
			Робот № 1	Робот № 2	Робот № 3	
Объем RAM, Мб (ресурс № 1)	Браузер	$O_{11} = 120$	120 + 60 + 60	120 + 60 + 60	120 + 60 + 60	720
	Текстовый процессор	$O_{12} = 85$	0	85 + 60	85 + 60	290
	Табличный процессор	$O_{13} = 65$	0	65 + 65	65 + 65	260
	Почта	$O_{14} = 65$	0	65 + 65	65 + 65	260
Потребности ПР в ресурсе № 1			240	645	645	1530
Количество потоков CPU (ресурс № 2)	Браузер	$P_{21} = 1$	1	1	1	3
	Текстовый процессор	$P_{22} = 1$	0	1	1	2
	Табличный процессор	$P_{23} = 1$	0	1	1	2
	Почта	$P_{24} = 1$	0	1	1	2
Потребности ПР в ресурсе № 2			1	4	4	9
Объем накопителя данных, Мб (ресурс № 3)	Браузер	$H_{31} = 2048$	2048	2048	2048	6144
	Текстовый процессор	$H_{32} = 1024$	0	1024	1024	2048
	Табличный процессор	$H_{33} = 1024$	0	1024	1024	2048
	Почта	$H_{34} = 512$	0	512	0	512
	Хранение файлов	нет	2048	100	100	2248
Потребности ПР в ресурсе № 3			4096	4708	4196	13000

сотрудником многофункционального центра составляет 155 секунд. Время выполнения ПР одной заявки составляет 100 секунд. Это говорит о том, что в данном случае две трети времени сотрудника расходуется на ожидание результатов работы используемого ПО и информационных сервисов. За 183 дня эксплуатации ПР экономия фонда рабочего времени сотрудников многофункционального

центра превысила 2015 человеко-часов или более 251 человеко-дня.

На рис. 2 представлена динамика поступления по дням заявок на изготовление ПР справки с места учебы, указанной в табл. 7.

Представленные на рис. 2 данные позволяют сделать вывод о том, что рассмотренная в настоящей статье задача управления численностью

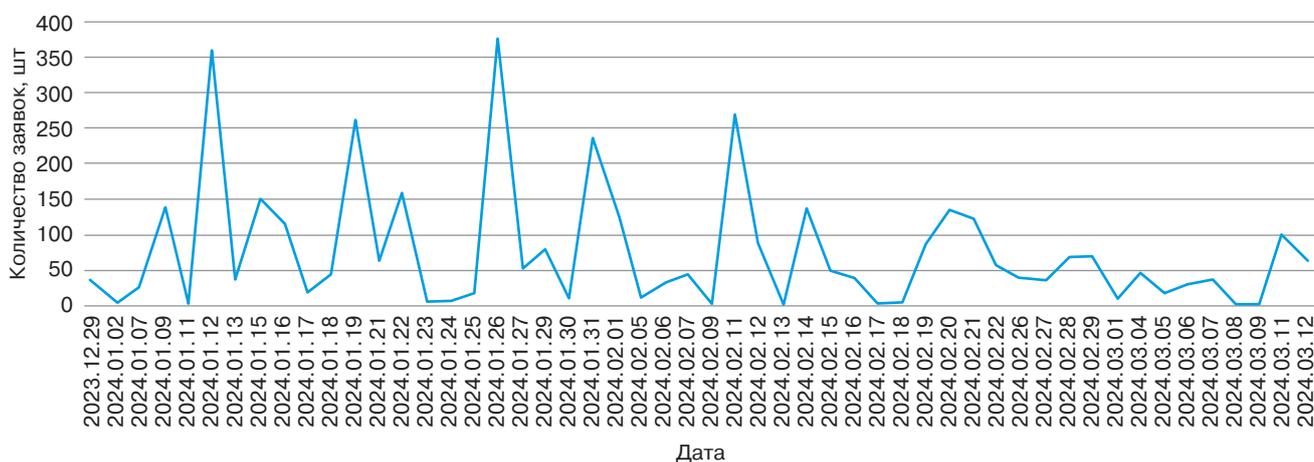


Рис. 2. Динамика поступления заявок на изготовление справок с места учебы

одновременно функционирующих ПР из некоторой совокупности их видов в условиях ограниченности выделенных вычислительных ресурсов и изменения количества поступающих на выполнение задач соответствующих видов актуальна как в рамках описанного выше проекта «Роботизация многофункционального центра» (с учетом ввода в эксплуатацию ПР из табл. 7 в 2024 и 2025 гг.), так и в рамках дальнейшей программной роботизации бизнес-процессов подразделений РТУ МИРЭА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автоматическая оптимизация состава совокупностей одновременно функционирующих ПР в соответствии с количеством поступающих на выполнение бизнес-задач и объемами выделяемых для их эксплуатации вычислительных ресурсов является одним из направлений развития функциональных возможностей RPA-платформ, обеспечивающим их дополнительную конкурентоспособность за счет минимизации затрат на содержание (аренду) требующихся компонентов ИТ-инфраструктуры.

Материал настоящей статьи задает основу и открывает перспективы в новом направлении исследований. Это направление является не только

универсальным в сфере развития технологий программной роботизации, но и востребованным как в контексте обеспечения импортозамещения иностранных RPA-платформ, так и в условиях необходимости повышения эффективности функционирования организаций (хозяйствующих субъектов) в национальной экономике РФ.

Вклад авторов

Вклад авторов в настоящую статью соответствует принципам взаимодействия научного руководителя и аспиранта.

А.С. Зуев – постановка задачи исследования, консультации по вопросам проведения, обобщения и оценки результатов всех его этапов.

Д.А. Леонов – постановка и формализация рассмотренных задач, разработка изложенных подходов и методов.

Authors' contributions

The authors' contributions to this article are consistent with the principles of supervisor–postgraduate student interaction.

A.S. Zuev – task statement, advice on conducting, summarizing and evaluating the results of all stages of the study.

D.A. Leonov – formulation and formalization of the considered tasks, development of the outlined approaches and methods.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елиферов В.Г., Репин В.В. *Бизнес-процессы. Регламентация и управление*. М.: ИНФРА-М; 2024. 319 с.
2. Долганова О.И. *Бизнес-процессы: анализ, моделирование, технологии совершенствования*. М.: КноРус; 2022. 324 с.
3. Денисенко В.Ю. Автоматизация производственных бизнес-процессов в условиях Индустрии 4.0 на промышленных предприятиях. *Вопросы инновационной экономики*. 2020;10(2):1007–1014. <https://doi.org/10.18334/vines.10.2.100878>
4. *Методологические основания технологических инноваций цифровой экономики*; под ред. М.О. Колбанева, И.Л. Коршунова. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского гос. экономического ун-та; 2023. 203 с.
5. Еремина И.И., Фролова О.Н., Нимазова Л.Н. *Платформа IC: Предприятие как инструмент совершенствования технико-экономического планирования предприятия*. Казань: Центр поддержки программ развития Казанского федерального университета; 2023. 112 с.
6. Серышев Р.В. *Инструменты управления бизнес-процессами организации*. М.: Русайнс; 2023. 276 с.
7. Ribeiro J., Lima R., Eckhardt T., Paiva S. Robotic Process Automation and Artificial Intelligence in Industry 4.0 – A Literature review. *Procedia Computer Science*. 2021;181(1):51–58. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.104>
8. Французов И.В. Стратегическая роль применения RPA-технологий в условиях современного технологического уклада. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент*. 2020;10(6):258–269.
9. Башлыкова А.А. *Интероперабельность и безопасность функционирования вычислительных и интеллектуальных систем*. М.: РТУ МИРЭА; 2022. 137 с. ISBN 978-5-7339-1645-3
10. Ermolaeva A.S., Selivanova M.A., Nemtsev V.N., Solomatin P.S. The Analysis of Implementation of Robotic Process Automation RPA: The Experience of Russian and Foreign Companies. In: Popkova E.G., Sergi B.S. (Eds.). *Modern Global Economic System: Evolutional Development vs. Revolutionary Leap. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021. V. 198. P. 1483–1492. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69415-9_164
11. Séguin S., Benkalaï I. Robotic Process Automation (RPA) Using an Integer Linear Programming Formulation. *Cybernetics and Systems*. 2020;51(4):357–369. <https://doi.org/10.1080/01969722.2020.1770503>
12. Соснило А.И., Соловьев Р.С. Оценка влияния технологии роботизации бизнес-процессов на современную экономическую систему. *Управленческое консультирование*. 2022;2(158):63–69. <https://doi.org/10.22394/1726-1139-2022-2-63-69>

13. Кутуков Н.Ю., Важдав А.Н. Применение в образовании технологии автоматизации Robotic Process Automation. *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Доклады ТУСУР)*. 2023;26(2):88–92. <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2023-26-2-88-92>
14. Дегтярева В.В., Панченко К.П. Оценка эффективности RPA-технологий для обоснования их внедрения в транспортно-логистическую отрасль. *Первый экономический журнал*. 2023;1(331):50–57. https://doi.org/10.58551/20728115_2023_1_50
15. Никищенко С.А., Гаранин А.В. Использование программных роботов для автоматизации бизнес-процессов на железной дороге. *Транспортное дело России*. 2023;4:163–165.
16. Бадмаева А.Д., Перерва О.Л. Риски внедрения технологии RPA на наукоемкое предприятие. *Научный результат. Экономические исследования*. 2020;6(3):46–52. <https://doi.org/10.18413/2409-1634-2020-6-3-0-6>
17. Zarooni L., El Khatib M. Robotics process automation (RPA) and project risk management. *International Journal of Business Analytics and Security (IJBAS)*. 2023;3(1):74–90. <https://doi.org/10.54489/ijbas.v3i1.198>
18. Шиболденков В.А., Кхан Д.М. Внедрение роботизированной автоматизации процессов на основе многокритериальной математической модели. *Развитие и безопасность*. 2023;4(20):62–73. URL: <https://ds.ntnu.ru/frontend/web/ngtu/files/nomera/2023/04/062.pdf>

REFERENCES

1. Eliferov V.G., Repin V.V. *Biznes-protsessy. reglamentatsiya i upravlenie (Business Processes. Regulation and Management)*. Moscow: INFRA-M; 2024. 319 p. (in Russ.).
2. Dolganova O.I. *Biznes-protsessy: analiz, modelirovanie, tekhnologii sovershenstvovaniya (Business Processes: Analysis, Modeling, Improvement Technologies)*. Moscow: KnoRus; 2022. 324 p. (in Russ.).
3. Denisenko V.Yu. Automation of Manufacturing Business Processes in the Context of Industry 4.0 in Industrial Enterprises. *Voprosy Innovatsionnoi Ekonomiki*. 2020;10(2):1007–1014 (in Russ.). <https://doi.org/10.18334/vinec.10.2.100878>
4. Kolbanev M.O., Korshunov I.L. (Eds.). *Metodologicheskie osnovaniya tekhnologicheskikh innovatsii tsifrovoi ekonomiki (Methodological Foundations of Technological Innovations of the Digital Economy)*. St. Petersburg: Saint Petersburg State University of Economics; 2023. 203 p. (in Russ.).
5. Eremina I.I., Frolova O.N., Nimazova L.N. *Platforma IS: Predpriyatie kak instrument sovershenstvovaniya tekhniko-ekonomicheskogo planirovaniya predpriyatiya (IC Platform: Enterprise as a Tool for Improving Technical and Economic Planning of an Enterprise)*. Kazan: Center for Support of Development Programs of Kazan Federal University; 2023. 112 p. (in Russ.).
6. Seryshev R.V. *Instrumenty upravleniya biznes-protsessami organizatsii (Tools for Managing Business Processes of an Organization)*. Moscow: Rusains; 2023. 276 p. (in Russ.).
7. Ribeiro J., Lima R., Eckhardt T., Paiva S. Robotic Process Automation and Artificial Intelligence in Industry 4.0 – A Literature review. *Procedia Computer Science*. 2021;181(1):51–58. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.104>
8. Frantsuzov I.V. The Strategic Role of Applying RPA Technologies and the Emergence of a new Technological Mode. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Sotsiologiya. Menedzhment = Proceedings of the Southwest State University. Series: Economy. Sociology. Management*. 2020;10(6):258–269 (in Russ.).
9. Bashlykova A.A. *Interoperabel'nost' i bezopasnost' funkcionirovaniya vychislitel'nykh i intellektual'nykh sistem (Interoperability and Security of Computing and Intelligent Systems Operation)*. Moscow: MIREA; 2022. 137 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7339-1645-3
10. Ermolaeva A.S., Selivanova M.A., Nemtsev V.N., Solomatin P.S. The Analysis of Implementation of Robotic Process Automation RPA: The Experience of Russian and Foreign Companies. In: Popkova E.G., Sergi B.S. (Eds.). *Modern Global Economic System: Evolutional Development vs. Revolutionary Leap. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021. V. 198. P. 1483–1492. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69415-9_164
11. Séguin S., Benkalai I. Robotic Process Automation (RPA) Using an Integer Linear Programming Formulation. *Cybernetics and Systems*. 2020;51(4):357–369. <https://doi.org/10.1080/01969722.2020.1770503>
12. Sosnilo A.I., Solovev R.S. Assessing the Impact of RPA on the Modern Economic System. *Upravlencheskoe konsul'tirovanie = Administrative Consulting*. 2022;2(158):63–69 (in Russ.). <https://doi.org/10.22394/1726-1139-2022-2-63-69>
13. Kutukov N.Y., Vazhdaev A.N. Application of Robotic Process Automation Technology in Education. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki (Doklady TUSUR) = Proceedings of TUSUR University*. 2023;26(2):88–92 (in Russ.). <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2023-26-2-88-92>
14. Degtyareva V.V., Panchenko K.P. Evaluation of the Effectiveness of the Technology to Justifying its Implementation in the Transport and Logistics Industry. *Pervyi ekonomicheskii zhurnal = First Economic Journal*. 2023;1(331):50–57 (in Russ.). https://doi.org/10.58551/20728115_2023_1_50
15. Nikishchenkov S.A., Garanin A.V. Using Software Robots to Automate Business Processes on the Railroad. *Transportnoe delo Rossii = Transport Business in Russia*. 2023;4:163–165 (in Russ.).
16. Badmaeva A.D., Pererva O.L. Risks of Implementing RPA Technology at a Knowledge-based Enterprise. *Nauchnyi rezul'tat. Ekonomicheskie issledovaniya = Research Result. Economic Research*. 2020;6(3):46–52 (in Russ.). <https://doi.org/10.18413/2409-1634-2020-6-3-0-6>

17. Zarooni L., El Khatib M. Robotics process automation (RPA) and project risk management. *International Journal of Business Analytics and Security (IJBAS)*. 2023;3(1):74–90. <https://doi.org/10.54489/ijbas.v3i1.198>
18. Shiboldenkov V.A., Khan D.M. Implementation of Robotic Process Automation Based on a Multi-Criterial Mathematical Model. *Razvitie i bezopasnost' = Development and Security*. 2023;4(20):62–73. Available from URL: <https://ds.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nomera/2023/04/062.pdf>

Об авторах

Зуев Андрей Сергеевич, к.т.н., доцент, директор Института информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: zuev_a@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 6737-5778, <https://orcid.org/0000-0002-1797-7585>

Леонов Дмитрий Алексеевич, аспирант, старший преподаватель, кафедра практической и прикладной информатики, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: leonov@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 1381-7071, <https://orcid.org/0009-0004-9775-6820>

About the authors

Andrey S. Zuev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Director of the Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: zuev_a@mirea.ru. RSCI SPIN-code 6737-5778, <https://orcid.org/0000-0002-1797-7585>

Dmitrii A. Leonov, Postgraduate Student, Senior Lecturer, Department of Practical and Applied Informatics, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: leonov@mirea.ru. RSCI SPIN-code 1381-7071, <https://orcid.org/0009-0004-9775-6820>

УДК 004.31

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-23-39>

EDN DRCIUU



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Выявление аппаратных уязвимостей цифровых устройств на основе систем сканирования и полунатурного моделирования

Е.Ф. Певцов,
Т.А. Деменкова[@],
А.О. Индришенок,
В.В. Филимонов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: demenkova@mirea.ru

Резюме

Цели. Развитие вычислительной техники и информационных систем требует рассмотрения вопросов их безопасности, различных методов обнаружения аппаратных уязвимостей цифровых компонентов устройств и защиты от несанкционированного доступа. Важным аспектом данных проблем является исследование существующих методов на возможность и способность выявить аппаратные ошибки или произвести поиск ошибок на соответствующих моделях. Цель работы – разработка подходов, инструментов и технологии для обнаружения уязвимостей в аппаратном обеспечении на ранней стадии проектирования, создание методики их обнаружения и оценки риска, рекомендаций по обеспечению безопасности на всех этапах процесса разработки вычислительных систем.

Методы. Используются методы полунатурного моделирования, сравнения и выявления аппаратных уязвимостей, стресс-тестирования для выявления уязвимостей.

Результаты. Предложены методы обнаружения и защиты от аппаратных уязвимостей, являющихся критически важным аспектом в обеспечении безопасности вычислительных систем. Для обнаружения уязвимостей в аппаратном обеспечении использованы методы сканирования портов, анализа протоколов связи и диагностики устройств. Определены возможные места нахождения аппаратных уязвимостей, их вариации, описаны атрибуты аппаратных уязвимостей и риски. Для обнаружения уязвимостей в аппаратном обеспечении на ранней стадии проектирования разработан специальный стенд полунатурного моделирования. Предложен алгоритм сканирования с использованием протокола Remote Bitbang, который позволяет передавать данные между OpenOCD и подключенным к отладочному порту устройством. На основе управления сканированием разработан метод верификации, реализующий сравнение поведенческой модели с эталоном. Приведены рекомендации по обеспечению безопасности на всех этапах процесса разработки вычислительных систем.

Выводы. В данной работе предложены новые технические решения для обнаружения уязвимостей в аппаратном обеспечении, основанные на таких методах, как сканирование системы на программируемой логической интегральной схеме, полунатурное моделирование, верификация по виртуальной модели, анализ протоколов связи и диагностика устройств. Применение разработанных алгоритмов и способов позволит разработчикам предпринять необходимые меры по устранению аппаратных уязвимостей и предотвращению возможных вредоносных воздействий на всех этапах процесса проектирования устройств вычислительной техники и информационных систем.

Ключевые слова: аппаратная уязвимость, цифровые компоненты, полунатурное моделирование, диагностика, сканирование, верификация

• Поступила: 30.08.2023 • Доработана: 13.01.2024 • Принята к опубликованию: 03.06.2024

Для цитирования: Певцов Е.Ф., Деменкова Т.А., Индришенок А.О., Филимонов В.В. Выявление аппаратных уязвимостей цифровых устройств на основе систем сканирования и полунатурного моделирования. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):23–39. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-23-39>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Identification of digital device hardware vulnerabilities based on scanning systems and semi-natural modeling

Evgeniy F. Pevtsov,
Tatyana A. Demenkova[@],
Alexander O. Indrishenok,
Vladimir V. Filimonov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
[@] Corresponding author, e-mail: demenkova@mirea.ru

Abstract

Objectives. The development of computer technology and information systems requires the consideration of issues of their security, various methods for detecting hardware vulnerabilities of digital device components, as well as protection against unauthorized access. An important aspect of this problem is to study existing methods for the possibility and ability to identify hardware errors or search for errors on the corresponding models. The aim of this work is to develop approaches, tools and technology for detecting vulnerabilities in hardware at an early design stage, and to create a methodology for their detection and risk assessment, leading to recommendations for ensuring security at all stages of the computer systems development process.

Methods. Methods of semi-natural modeling, comparison and identification of hardware vulnerabilities, and stress testing to identify vulnerabilities were used.

Results. Methods are proposed for detecting and protecting against hardware vulnerabilities: a critical aspect in ensuring the security of computer systems. In order to detect vulnerabilities in hardware, methods of port scanning, analysis of communication protocols and device diagnostics are used. The possible locations of hardware vulnerabilities and their variations are identified. The attributes of hardware vulnerabilities and risks are also described. In order to detect vulnerabilities in hardware at an early design stage, a special semi-natural simulation stand was developed. A scanning algorithm using the Remote Bitbang protocol is proposed to enable data to be transferred between *OpenOCD* and a device connected to the debug port. Based on scanning control, a verification method was developed to compare a behavioral model with a standard. Recommendations for ensuring security at all stages of the computer systems development process are provided.

Conclusions. This paper proposes new technical solutions for detecting vulnerabilities in hardware, based on methods such as FPGA system scanning, semi-natural modeling, virtual model verification, communication protocol analysis and device diagnostics. The use of the algorithms and methods thus developed will allow developers to take the necessary measures to eliminate hardware vulnerabilities and prevent possible harmful effects at all stages of the design process of computer devices and information systems.

Keywords: hardware vulnerability, digital components, half-life modeling, diagnostics, scanning, verification

• Submitted: 30.08.2023 • Revised: 13.01.2024 • Accepted: 03.06.2024

For citation: Pevtsov E.F., Demenkova T.A., Indrishenok A.O., Filimonov V.V. Identification of digital device hardware vulnerabilities based on scanning systems and semi-natural modeling. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):23–39. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-23-39>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Аппаратная уязвимость – ошибка в технической реализации аппаратуры, которая позволяет злоумышленникам получить доступ к системе или ее приложению. Современные аппаратные уязвимости могут иметь серьезные последствия для безопасности компьютерных систем, включая компрометацию конфиденциальных данных, нарушение работоспособности систем и потенциальную угрозу для жизни и здоровья людей в случае использования уязвимостей в медицинском оборудовании или автомобильной технике¹.

Аппаратные уязвимости могут быть различными и включают в себя ошибки в различных компонентах компьютера: процессоре, микросхемах, памяти, аппаратных модулях и драйверах. Также они содержатся в других аппаратных сложно-функциональных блоках (СФ-блоках). Аппаратные уязвимости могут проявляться в результате взаимодействия с программным обеспечением (ПО), в частности с драйверами, базами данных и другими приложениями, содержащими ошибки или зловредный код.

Проверка на наличие уязвимостей является сложным процессом и требует участия специалистов в области безопасности информации². Определить аппаратную уязвимость можно с помощью сканирования исследуемой системы для нахождения проблемных мест и их последующего устранения [1]. Одним из вариантов поиска уязвимостей в существующих вычислительных устройствах является использование специализированных программных

средств и инструментов. Например, существует множество утилит и приложений для поиска и анализа уязвимостей, которые могут быть использованы для проверки безопасности сетевых устройств и др. Или же может быть применен комплексный подход сравнения моделей в виде связки *OpenOCD*³ и программной модели устройства, полученной с помощью *Verilator* [2] из языков описания аппаратуры⁴.

Для поиска уязвимостей также применяют методы анализа и обратного инжиниринга. Эти методы могут использоваться для поиска уязвимостей в программно-аппаратных комплексах, операционных системах, драйверах устройств и других вычислительных системах [3].

Каждая уязвимость имеет определенные атрибуты, которые можно использовать для ее обнаружения. В статье описываются атрибуты аппаратных уязвимостей, методы их обнаружения и оценки риска. Атрибуты аппаратных уязвимостей рассмотрены в соответствии с принятой таксонометрией, предложенной в ряде работ классификацией по категориям идентификации аппаратных уязвимостей и оценки их риска или серьезности [4]. В этой таксонометрии выделены четыре многопараметрических признака (вектора), соответствующие идентификации аппаратных уязвимостей, идентификации обнаружения аппаратных уязвимостей, риску или

¹ Zantout S. *Hardware Trojan Detection in FPGA through Side-Channel Power Analysis and Machine Learning*. MSc Thesis. University of California, Irvine. 2018. <https://escholarship.org/uc/item/7hk8x6rb>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

² Oberg J. *Testing Hardware Security Properties and Identifying Timing Channels*. UC San Diego. 2014. P. 5–38. <https://escholarship.org/uc/item/8b530988>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

³ Документация по OpenOCD RISC-V Debug Configuration Commands [Documentation regarding OpenOCD RISC-V Debug Configuration Commands]. https://openocd.org/doc/html/Architecture-and-Core-Commands.html#RISC_002dV-Debug-Configuration-Commands. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

⁴ Андрианов А.В. *Реализация возможности пошаговой отладки при отладке тестовых сценариев на модели СБИС СнК*. <https://www.module.ru/uploads/media/1534156062-2018-833a272aac.pdf>. Дата обращения 15.05.2023. [Andrianov A.V. *Realization of possibility of step-by-step debugging at debugging of test scenarios on VLSI SonC model*. <https://www.module.ru/uploads/media/1534156062-2018-833a272aac.pdf> (in Russ.). Accessed May 15, 2023.]

серьезности аппаратных уязвимостей и эффективности обнаружения аппаратных уязвимостей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ТАКСОНОМЕТРИЯ АППАРАТНЫХ ЗАКЛАДОК

Каждая аппаратная уязвимость имеет ряд атрибутов, поэтому были разработаны методы, позволяющие выполнять их обнаружение с отдельными или всеми атрибутами. Информация о векторах и атрибутах в дальнейшем необходима для подбора методов выявления уязвимостей.

Ранжирование атрибутов в каждой категории может осуществляться на основе их важности, уникальности, весовых коэффициентов или других критериев, определенных в рамках конкретного проекта или задачи по обнаружению троянов. Под аппаратным трояном понимается вредоносный модуль, встроенный в интегральную схему, либо вредоносная модификация схемы для изменения ее работы или добавления дополнительного функционала, например, для организации канала утечки информации.

Вектор ИТ (идентификация трояна) включает атрибуты, которые используются для идентификации троянов, например, размер трояна, расположение в схеме, механизмы защиты, используемые трояном, и другие характеристики, которые могут быть уникальными для конкретного трояна.

Вектор ИОТ (идентификация обнаружения трояна) включает атрибуты, которые могут быть обнаружены при использовании определенного метода обнаружения трояна, например, изменения в сигналах трояна, аномалии в поведении трояна, особенности атаки, используемые трояном, и другие признаки, которые могут быть обнаружены при применении конкретного метода.

Вектор СТ (риск или серьезность трояна) включает атрибуты, которые оценивают риск или серьезность трояна, например, возможность трояна причинить вред, степень скрытности трояна, возможность его распространения, потенциальные последствия его действий и другие факторы, которые могут влиять на серьезность трояна.

Вектор ЭОТ (эффективность обнаружения трояна) включает атрибуты, которые оценивают эффективность конкретного метода обнаружения трояна, например, точность обнаружения, ложноположительные и ложноотрицательные срабатывания метода, скорость обнаружения, сложность реализации метода и другие факторы, которые могут влиять на эффективность метода.

Эти векторы могут быть использованы для оценки троянов и выбора наиболее эффективного метода их обнаружения, идентификации и оценки риска или серьезности.

Комбинация значений векторов ИТ, ИОТ, СТ и ЭОТ может быть использована для выбора наиболее эффективного метода обнаружения трояна на основе определенных критериев и требований проекта или задачи. Например, метод с высокими значениями векторов ИТ и ЭОТ, указывающими на высокую способность обнаружения трояна и эффективность метода, может быть предпочтительнее, чем метод с более низкими значениями в этих векторах. Атрибуты в векторе СТ могут также использоваться для оценки степени серьезности трояна и его приоритета при выборе метода обнаружения.

Атрибуты в каждой категории используются для идентификации троянов и оценки их риска или серьезности. Они также могут быть использованы для определения методов обнаружения троянов и оценки их эффективности. Каждому трояну присваиваются два вектора: ИТ и СТ. Первый идентифицирует соответствующие атрибуты, а второй представляет атрибуты с точки зрения их риска или серьезности. Каждый метод обнаружения трояна также имеет два вектора: ИОТ и ЭОТ. ИОТ идентифицирует атрибуты, которые могут быть обнаружены, а ЭОТ представляет атрибуты с точки зрения эффективности метода. Таким образом, существует четыре вектора соответствующие: 1) ИТ, 2) ИОТ, 3) СТ, 4) ЭОТ [5].

Предложенный подход, основанный на ранжировании атрибутов троянов в каждой категории и использовании векторов ИТ, СТ, ИОТ и ЭОТ, может быть полезным инструментом для идентификации и оценки риска троянов, а также для выбора эффективных методов обнаружения при разработке более надежных систем безопасности и защиты от атак.

Однако следует отметить, что предлагаемая система ранжирования атрибутов троянов может быть ограничена, поскольку новые виды троянов и их атрибуты могут возникать в результате развития технологий и методов атаки. Поэтому необходимо постоянно обновлять и дополнять базу данных атрибутов троянов и методов их обнаружения для более эффективной защиты от них.

Обнаружение уязвимостей – это только первый шаг, необходимо предпринять меры по устранению этих уязвимостей и предотвращению возможных атак. В этом процессе важную роль могут играть инструменты, такие как системы автоматизированного проектирования (САПР), которые позволяют верифицировать устройства и обнаруживать уязвимости на ранней стадии проектирования. Типичным примером такой системы является комплекс инструментов САПР компании Cadence Design Systems [6]. В целом, безопасность является критически важным аспектом в разработке вычислительных систем, обнаружение и защита от аппаратных уязвимостей

должны учитываться на всех этапах процесса разработки и эксплуатации.

Помимо осуществляемой функции уязвимость можно модернизировать с целью удаленного взаимодействия, для чего необходимо запрограммировать возможность доступа к сетевой карте и выхода в сеть. Кроме этого, можно настроить закладку не только на порчу выходных данных в данный момент времени, но и на изменение уже записанных данных. Для этого закладка должна обладать выходом к хранилищам памяти и либо возможностью выявления определенных данных, либо возможностью изменения всех данных на определенную величину. Написание и модернизация закладки ограничиваются лишь навыками самого злоумышленника и размерами закладки [7–9].

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ АППАРАТНОЙ ЗАКЛАДКИ

Важным аспектом методики выявления аппаратных закладок является процедура создания возможных примеров. Обычно основная трудность возникает в том, что именно надо показать и каким образом представить. Приведенный пример может быть полезен разработчикам защитных средств

вычислительной техники при проектировании в части выявления возможных уязвимостей.

Рассмотрим аппаратные закладки, нарушающие корректность вычислений в ядрах аппаратного ускорителя математических вычислений. При сложении вещественных чисел на сумматоре, умножителе или делителе можно составить аппаратную закладку, нарушающую корректность вычислений. Внедрим закладку в алгоритм сложения и в код сумматора при помощи отдельного модуля и произведем синтез полученного вычислительного блока.

Модуль выполняет следующую процедуру: при поступлении в сумматор определенного числа закладка срабатывает и заменяет это число на то, которое нужно злоумышленнику, после чего передает это число непосредственно на суммирование. В случае, если закладка не получила необходимого ей для перехода числа, то она остается неактивной. Таким образом, закладка осуществляет порчу выходных данных, выдавая при этом свое появление в конкретный момент поступления на вход определенного числа. На рис. 1 представлен алгоритм работы блока сумматора для отработки навыков внедрения и выявления закладок в наиболее распространенных узлах цифровых систем вычислительной техники.

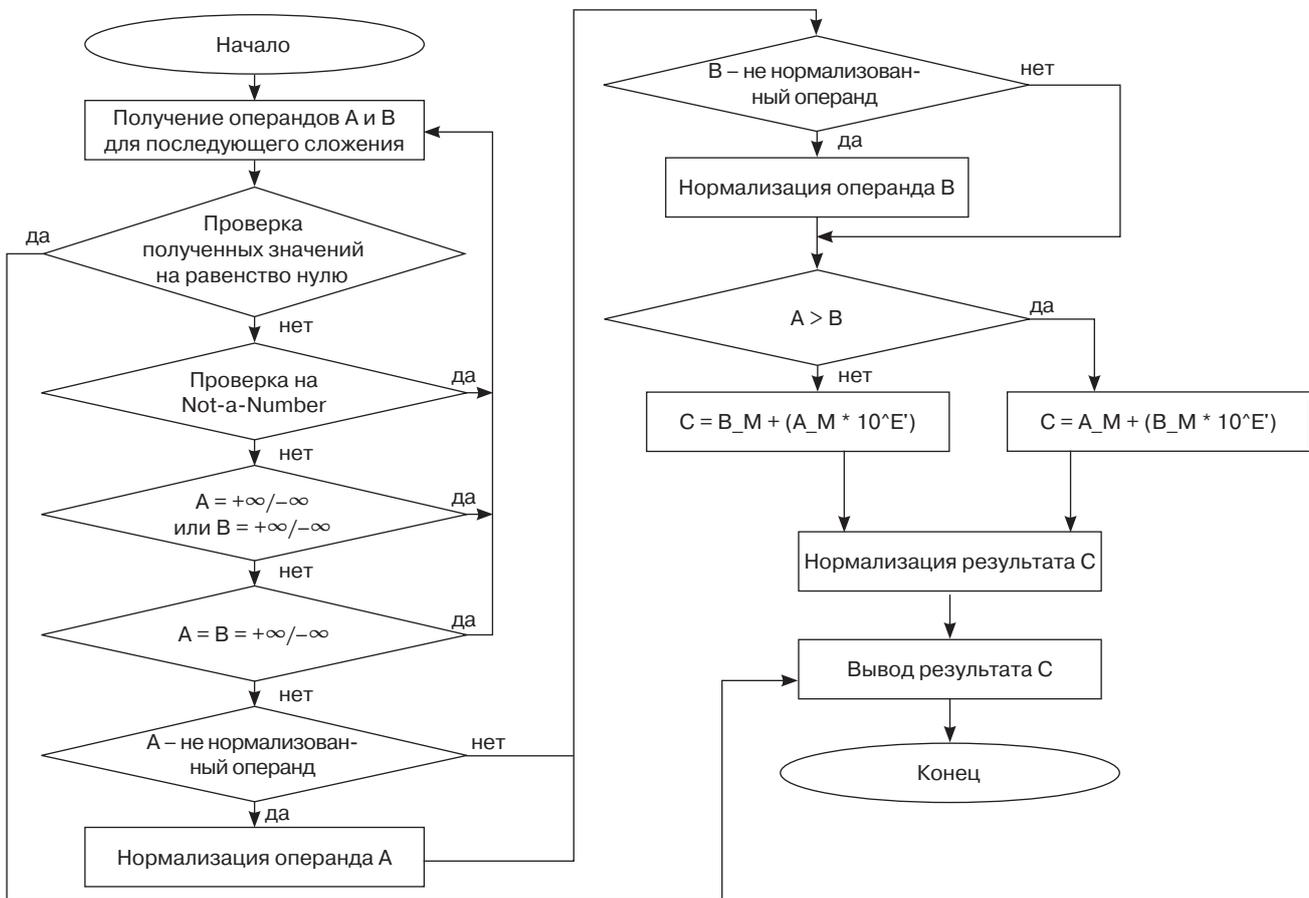


Рис. 1. Алгоритм работы сумматора

Аппаратная закладка при наличии дробной части в результате будет менять ее значение, изменяя точность вычисления. Наличие дробной части в числе в закодированном 32-битном формате стандарта IEEE 754⁵ можно обнаружить по наличию единиц в разрядах

$$s + e + \text{exp} + 1 \leq n, \quad (1)$$

где s – количество бит, выделяемых под знак числа; e – количество бит, выделяемых под смещенную экспоненту числа; exp – экспонента числа; n – общее количество бит.

В 32-разрядном представлении (1) можно записать как:

$$10 + \text{exp} \leq 32. \quad (2)$$

Если число имеет дробную часть, то инвертируем разряд $s + e + \text{exp} + 2$. Иными словами, число $5.5_{10} = 101.100_2$ после инвертирования данного разряда станет равным $5.75_{10} = 101.110_2$.

Блок-схема алгоритма аппаратной закладки приведена на рис. 2 [10, 11].

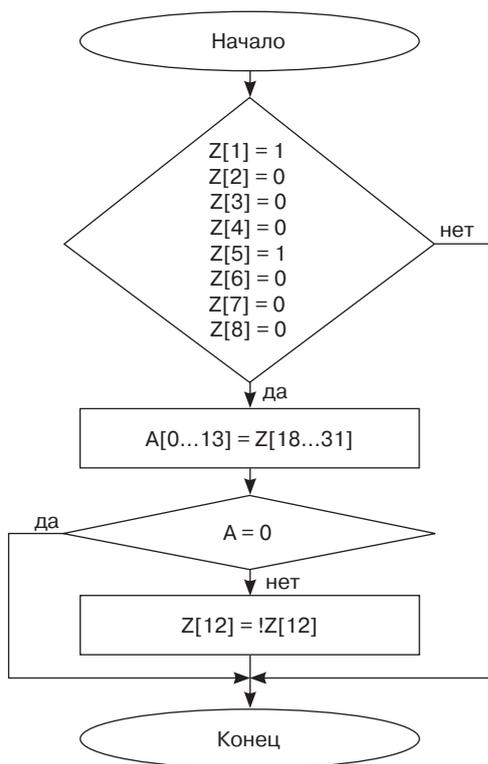


Рис. 2. Блок-схема алгоритма аппаратной закладки

Чтобы данное событие, при котором срабатывает аппаратная закладка, было менее частым, возьмем

⁵ 2754-2019 IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic. July 22, 2019. Electronic ISBN 978-1-5044-5924-2. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8766229>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

только числа, у которых, помимо наличия дробной части, значения будут приниматься только в пределах $512 \leq x < 1024$. Условие на выполнение данного условия можно получить из значения экспоненты двоичного числа. Если экспонента двоичного числа равна $9_{10} = 1001_2$, что соответствует смещенной экспоненте 10001000_2 , то данное число лежит в интервале $512 \leq x < 1024$.

В результате данный аппаратный троян будет изменять результат на сумматоре, только если этот результат принадлежит интервалу $512 \leq x < 1024$ и имеет дробную часть.

Так как мы определили порядок требуемых для искажения чисел, равный 9_{10} , то ранее описанный этап нахождения нужного разряда в числе на проверку, имеет ли данное число дробную часть, более не требуется. Любые числа 32-битного формата IEEE 754, лежащие в интервале $512 \leq x < 1024$ и имеющие единицу в любом из $18 \leq n \leq 31$ разрядов, будут иметь дробную часть согласно формулам (1) и (2):

$$1 + 8 + 9 + 1 = 19 \leq n.$$

Закодированная дробная часть числа будет расположена в интервале с 19 разряда по 32 разряд, а закодированная целая часть числа находится в разрядах с 9 по 17. Следовательно, для проверки, имеет ли число дробную часть, требуется найти хотя бы одну единицу в разрядах 18–31.

С шины результата сумматора считывается значение полученного закодированного числа в регистр Z аппаратного трояна. Если смещенная экспонента числа равна 10001000_2 , то в регистр A аппаратной закладки записывается остаток мантиссы закодированного числа. Далее, если данный регистр A является не пустым, то в регистре Z инвертируется значение z 12 разряда, что соответствует второму разряду дробной части числа, в результате чего число либо увеличивается на 0.25, если в данном разряде находится 0, либо уменьшается на 0.25, если в данном разряде находится 1. Разработанный аппаратный троян может быть встроен в ядро сумматора вещественных чисел аппаратного ускорителя математических вычислений. Описание разрабатываемой закладки выполняется на языке Verilog [12].

После успешной разработки аппаратного трояна надо выполнить верификацию. Требуется определить, правильно ли работает аппаратная закладка в зависимости от заданных условий. Для данной проверки определим несколько возможных событий. Каждое из событий должно быть проверено как с наличием аппаратного трояна, так и при его отсутствии.

1. Результат сумматора принадлежит интервалу $512 \leq x < 1024$.
 - а) результат имеет дробную часть;
 - б) результат не имеет дробной части.
2. Результат сумматора не принадлежит интервалу $512 \leq x < 1024$.
 - а) результат меньше 512 и имеет дробную часть;
 - б) результат меньше 512 и не имеет дробной части;
 - в) результат больше или равен 1024 и имеет дробную часть;
 - г) результат больше или равен 1024 и не имеет дробной части.
3. Результат сумматора является исключительным числом.
 - а) результат равен 0;
 - б) результат равен $+\infty$;
 - в) результат равен $-\infty$.

Такую аппаратную уязвимость можно обнаружить, применяя следующие способы.

1. **Анализ аномального поведения.** Наличие закладки может привести к аномальному поведению математического блока (FPU, floating-point unit), такому как неожиданные ошибки вычислений, неправильные результаты, или необычная активность во время выполнения математических операций.
2. **Применение теста производительности Linpack [13].** Аппаратную закладку, введенную в FPU, сложно обнаружить с помощью этого теста, поскольку его объем незначительно влияет на производительность. Однако этот метод окажется эффективным, если имеется возможность сравнить два аппаратных блока – с закладкой и без нее. Одна модель имеет намеренно внедренную аппаратную уязвимость и загружена в программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС), а другая модель является поведенческой и реализуется с некоторыми упрощениями в симуляторе на компьютере при помощи специальных инструментов САПР для интегральных схем, например, инструментов Cadence Design Systems.
3. **Проверка набора инструкций,** выполняемых внутри процессора с использованием интерфейса JTAG (Joint Test Action Group)⁶ и системы сканирования на основе протокола Remote Bitbang. В частности, аудит микрокода FPU на наличие необычных или подозрительных инструкций, которые могут указывать на наличие аппаратной закладки.

Протокол Remote Bitbang — это протокол, используемый в *OpenOCD* (открытая программа

для отладки встраиваемых систем), который позволяет передавать данные между *OpenOCD* и устройством, которое подключено к отладочному порту. Протокол Remote Bitbang используется для управления вводом-выводом и другими интерфейсами устройства.

В протоколе Remote Bitbang используется асинхронная передача данных, которая представляется в виде простого формата сообщений. Команды, отправляемые по этому протоколу, имеют два типа: команды для записи и команды для чтения. Команды для записи позволяют управлять выводами, передавать данные и устанавливать режимы работы интерфейсов, а команды для чтения позволяют получать данные от устройства через вводы.

Протокол Remote Bitbang используется в сочетании с такими протоколами как JTAG для обеспечения полноценной отладки и программирования встраиваемых систем. Этот протокол может быть использован для сканирования регистров на удаленном устройстве, подключенном к *OpenOCD*, и в процессах автоматизации тестирования, диагностики неисправностей и программирования устройств в производственных условиях [14–16].

4. **Использование специализированных инструментов** (анализаторы микрокода и специализированные стенды для обнаружения аппаратных закладок), которые могут быть полезны в выявлении таких угроз. Однако для их использования требуются специальные знания и опыт.

СТЕНД ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При разработке стенда, предназначенного для выявления аппаратных уязвимостей, принималось во внимание, что он должен обеспечить достоверность полученных результатов и выполнение следующих функций:

1. Возможность тестирования различных типов аппаратного обеспечения, включая процессоры, чипсеты, контроллеры устройств ввода-вывода, сетевые карты и другие компоненты.
2. Возможность использования различных инструментов для обнаружения уязвимостей в аппаратном обеспечении, включая сканеры уязвимостей, дебаггеры, эмуляторы и другие средства.
3. Возможность проведения экспериментов в различных сценариях, включая атаки на аппаратное обеспечение с помощью вредоносных программ, манипуляции с памятью и периферийными устройствами, а также эксплойты уязвимостей.
4. Обеспечение безопасности и защиты данных во время проведения экспериментов, включая

⁶ <https://ru.wikipedia.org/wiki/JTAG> (in Russ.). Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

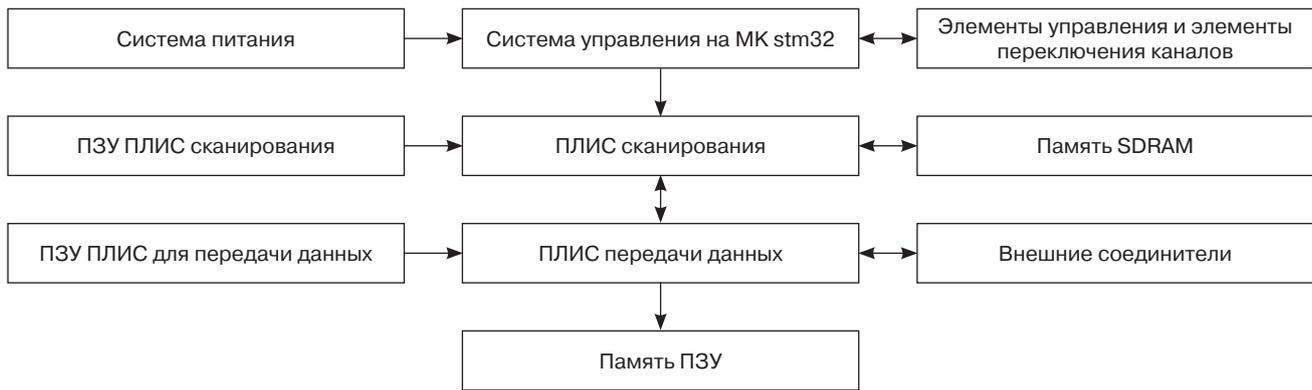


Рис. 3. Структура стенда для проведения экспериментов по выявлению аппаратных уязвимостей. ПЗУ – постоянное запоминающее устройство; SDRAM, synchronous dynamic random access memory – синхронная динамическая память с произвольным доступом; МК stm32 – микроконтроллер STM32

защиту от утечки конфиденциальной информации и обеспечение конфиденциальности результатов тестирования.

5. Обеспечение возможности воспроизведения результатов тестирования и документирования всех шагов эксперимента, включая средства автоматизации тестирования и инструменты для анализа результатов.

Структурная схема стенда приведена на рис. 3.

Особенностью данной структуры является специальная структура ПЛИС, позволяющая проводить повторную проверку прошивки для гарантирования отсутствия изменений в схеме CPLD⁷. Также есть возможность использовать встроенные ресурсы ПЛИС для базовой проверки прошивки с использованием встроенных средств контроля.

Верификация Verilog-кода, который используется для формирования файла прошивки (bitstream), может быть выполнена с использованием различных методов и инструментов, таких как симуляция, формальная верификация и эмуляция на аппаратном обеспечении.

1. **Симуляция.** После создания тестовых векторов, которые представляют различные сценарии загрузки bitstream в ПЛИС, следует использовать симулятор Verilog для выполнения симуляции этих тестовых векторов. В результате можно анализировать значения сигналов внутри схемы сравнения bitstream и сравнивать их с ожидаемыми значениями. Это позволит обнаружить ошибки и проверить правильность работы методов сравнения bitstream.
2. **Формальная верификация** – метод проверки корректности Verilog-кода на основе математических алгоритмов. Можно использовать инструменты формальной верификации, например,

model checking или equivalence checking, для проверки корректности работы методов сравнения bitstream. Это может включать проверку правильности логики сравнения, детектирование потенциальных ошибок и нахождение неожиданных путей выполнения.

3. **Эмуляция на аппаратном обеспечении.** Загрузка bitstream в ПЛИС и запуск его на физическом устройстве. Затем можно использовать тестовые векторы и физические сигналы для проверки корректности работы методов сравнения bitstream в реальном времени. Это может помочь выявить возможные проблемы при работе на реальном аппарате.

4. **Ручная проверка.** Можно внимательно анализировать код методов сравнения bitstream и проводить ручную проверку на соответствие требованиям и ожидаемому поведению. Это может включать анализ логики, проверку граничных условий и тестирование различных сценариев загрузки bitstream.

Другой особенностью архитектуры стенда полунатурного моделирования является возможность загрузки во внутреннюю память через внутренний интерфейс реконfigurирования ПЛИС. Если такой интерфейс отсутствует, то можно использовать стандартный внешний интерфейс реконfigurации. Для того чтобы избежать проблем при проверке и загрузке в память из буфера FIFO⁸, необходимо размещать блоки проверки в строго отведенных ячейках ПЛИС при написании конфигурации и раскладке на кристалле. Кроме того, этот модуль имеет многоступенчатую проверку, которая позволяет обнаруживать угрозы, сообщать о них и устранять возможные негативные последствия. Отчет о результатах проверки сохраняется и может быть использован для дальнейшего анализа и улучшения работы модуля.

Поскольку архитектуры ПЛИС в зависимости от модели и производителя могут отличаться, данная

⁷ Complex programmable logic device – сложное программируемое логическое устройство.

⁸ FIFO – first in, first out.

структура позволяет адаптировать алгоритмы проверки к разным архитектурам и производителям. По сравнению с ближайшими аналогами данный модуль является более актуальным, поскольку имеет возможность подключения к различным внешним устройствам, что обеспечивает его универсальность и возможность применения в качестве ведущего устройства в системах коммутации информации, а также в системах с высокопроизводительными процессорами [17, 18].

Перед началом сканирования необходимо выбрать режимы работы устройства, которые позволят определить возможные уязвимости в системе передачи данных по интерфейсу RS-485. Например, можно настроить устройство на отправку злонамеренных команд или на перехват и анализ данных, передаваемых по сети. При этом необходимо учитывать, что такие действия могут привести к нарушению работы устройства или сети в целом, поэтому проведение экспериментов необходимо проводить в контролируемой среде и с предварительным согласованием с ответственными за работу системы [1, 19].

Пример реализации стенда полунатурного моделирования приведен на рис. 4.



Рис. 4. Реализация стенда полунатурного моделирования

В ПЛИС передачи данных загружается конфигурация в соответствии с целевой моделью, которая описывает ожидаемые результаты работы устройства. После этого начинается процесс получения показаний с внешних интерфейсов исследуемого блока, таких как RS-485 или Ethernet⁹,

⁹ Андрианов А.В. Реализация возможности пошаговой отладки при отладке тестовых сценариев на модели СБИС СнК. <https://www.module.ru/uploads/media/1534156062-2018-833a272aac.pdf>. Дата обращения 15.05.2023. [Andrianov A.V. Realization of possibility of step-by-step debugging at debugging of test scenarios on VLSI SonC model. <https://www.module.ru/uploads/media/1534156062-2018-833a272aac.pdf> (in Russ.). Accessed May 15, 2023.]

и их сравнение с целевой моделью. В случае если результаты не соответствуют ожидаемым, формируется ошибка и заносится в отчет, а индикатор на устройстве сигнализирует о возникновении ошибки¹⁰.

При подключении стенда и отладки прошивки ПЛИС для получения необходимых данных для произведения сравнения с целевой моделью, развернутой на компьютере, важно обратить внимание на то, что схема подключения программатора JTAG к ПЛИС может отличаться в зависимости от конкретной модели программатора и ПЛИС, а также от задачи, которую необходимо решить при помощи данного подключения^{11, 12, 13}. В этом случае при необходимости подключения дополнительных периферийных устройств к ПЛИС, например, для отладки системы, содержащей микроконтроллер, может потребоваться подключение специального отладочного модуля.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Тест стенда полунатурного моделирования выполнен на основе проверки проекта процессора, например, RISC-V¹⁴, в поведенческое описание которого на языке Verilog введен код намеренной аппаратной уязвимости. Данная уязвимость может быть представлена в виде модифицированного СФ-блока, готового к встраиванию в систему с архитектурой RISC-V для проведения экспериментов по выявлению аппаратной уязвимости¹⁵ [20].

¹⁰ Fern N.C. *Verification Techniques for Hardware Security*: Ph.D. Thesis (Comput.). USA: UC Santa Barbara; 2016. P. 10–25. <https://escholarship.org/uc/item/2ch6f44s>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

¹¹ Документация Cadence [Cadence documentation]. https://www.cadence.com/content/cadence-www/global/en_US/home/support/documentation.html. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

¹² Yang P. *Assessing VeSFET Monolithic 3D Technology in Physical Design, Dynamic Reconfigurable Computing, and Hardware Security*: Ph.D. Thesis (Comput.). USA: UC Santa Barbara; 2017. P. 62–81. <https://escholarship.org/uc/item/5s9833kz>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

¹³ Farinholt B.R. *Understanding the Remote Access Trojan malware ecosystem through the lens of the infamous DarkComet RAT*: Ph.D. Thesis (Comput.). Sci. USA: UC San Diego; 2019. P. 17–29. <https://escholarship.org/uc/item/3vv544n5>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

¹⁴ RISC-V – расширяемая открытая и свободная система команд и процессорная архитектура на основе концепции RISC (reduced instruction set computer), предназначенная для создания процессоров/микроконтроллеров и разработки ПО. [RISC-V is an extensible open and free instruction system and processor architecture based on the RISC (reduced instruction set computer) concept for processor/microcontroller design and software development.]

¹⁵ Li C. *Securing Computer Systems Through Cyber Attack Detection at the Hardware Level*: Ph.D. Thesis (Comput.). USA: UC Irvine; 2020. P. 13–26. <https://escholarship.org/uc/item/8vr8f0dq>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

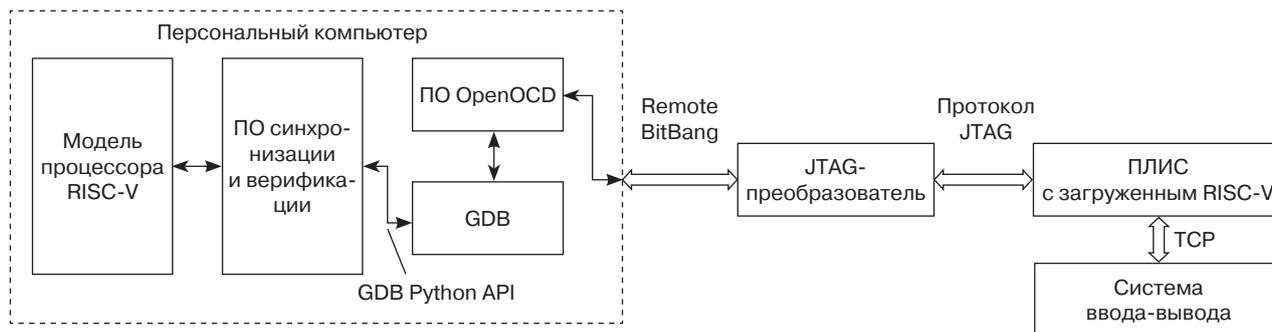


Рис. 5. Модель для поиска уязвимостей в основанной на процессоре RISC-V системе. API, application programming interface – программный интерфейс приложения; TCP, transmission control protocol – протокол передачи данных; GDB, Gnu DeBugger – отладчик с открытым кодом

После внедрения модифицированного аппаратного СФ-блока необходимо провести сравнение работы и попытаться выявить узел с уязвимостью сначала с использованием ПО на выявление ошибок. Затем с применением анализа виртуальной модели провести анализ на ПЛИС с использованием связи протоколов Remote Bitbang и JTAG, а также ПО *OpenOCD*, после чего провести сравнение результатов и выявить возможные отклонения от созданной поведенческой модели устройства. Общая концепция идеи сканирования представлена на рис. 5.

Под поведенческой моделью устройства понимается абстрактная модель, описывающая функциональное поведение устройства и его взаимодействие с другими компонентами системы. Она описывает, как конкретный блок должен вести себя при определенных входных сигналах и условиях без уточнения внутренней реализации устройства, и как это поведение отражается на общей картине взаимодействия устройства с внешними источниками информации.

Предполагается, что для проверки следует использовать описание на языке UML (unified modeling language), который применяется для описания поведения устройства в целом, но возможны и другие варианты.

Для проверки кода Verilog на наличие уязвимостей или аппаратных закладок можно использовать системы автоматической проверки безопасности. Такие системы анализируют код на наличие ошибок и ищут возможные уязвимости. Для анализа и проверки кода Verilog на уязвимости также можно использовать сторонние инструменты, такие как *Verilator* и *VeriSim*¹⁶.

Verilator – это транслятор с открытым исходным кодом из Verilog в Си/C++, генерирующий файлы для профилирования и отладки. Он позволяет пользователям проанализировать код на наличие аппаратных закладок и уязвимостей. Этот инструмент можно использовать для автоматической проверки кода Verilog на ошибки.

VeriSim – другой инструмент для анализа и проверки кода Verilog. Он позволяет пользователям проанализировать код, используя симуляцию и профилирование. Также он позволяет идентифицировать аппаратные закладки и уязвимости в коде Verilog.

Альтернативными инструментами для анализа и проверки кода Verilog на наличие аппаратных закладок и уязвимостей могут являться *Vivado HLS*¹⁷, *Synopsys VCS*¹⁸ и *Mentor Questa*¹⁹.

Для поиска уязвимостей в коде программы на языке SystemC можно использовать автоматические инструменты поиска уязвимостей, такие как *SonarQube*²⁰ и *Coverity*²¹. Эти инструменты позволяют автоматизированно просканировать исходный код на предмет уязвимостей. В случае, если уязвимости или аппаратные закладки не будут найдены, существует риск того, что приложение будет подвержено атакам со стороны злоумышленников, которые могут воспользоваться уязвимостью для внесения

¹⁷ <https://docs.xilinx.com/r/en-US/ug949-vivado-design-methodology/Vivado-Design-Suite-User-and-Reference-Guides>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

¹⁸ <https://users.ece.utexas.edu/~patt/10s.382N/handouts/vcs.pdf>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

¹⁹ https://www.orcada.ru/product/mentor-graphics/proektirovanie-zakaznyh-ims/products_106.html (in Russ.). Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

²⁰ <https://www.sonarsource.com/products/sonarqube/>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

²¹ <https://devguide.python.org/development-tools/coverity/>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

```
set(MCU_RISCV RISCV)
set(START_FILE startup.s) # стартовый файл s

add_compile_options(-Wall -Wextra)
add_compile_options(-O2 -ggdb)
add_link_options(-mthumb -mcpu=fpv4-sp-d16 -mfloat-abi=hard
                 -T${RISCV_LDSCRIPT} --specs=nosys.specs --specs=nano.specs)

# set the project name
project(Test_firs_prj VERSION 0.1)

include_directories(
    "${PROJECT_BINARY_DIR}"
    "${PROJECT_SOURCE_DIR}/inc"
    "${PROJECT_SOURCE_DIR}/library/CMSIS"
)

set_property(SOURCE ${START_FILE} PROPERTY LANGUAGE C)

add_subdirectory(library/CMSIS)

configure_file(inc/version.h.in inc/version.h)

list(APPEND TARGET_SOURCE ${PROJECT_SOURCE_DIR}/inc/main.h)
list(APPEND TARGET_SOURCE ${PROJECT_SOURCE_DIR}/src/main.c)
```

Рис. 6. Пример системы сборки программных тестов

в код нежелательных изменений или получения доступа к данным^{22, 23, 24, 25, 26} [21, 22].

Для выполнения синхронизации между виртуальным процессором и реальным процессором, которые проходят отладку, можно использовать возможности *OpenOCD*. Необходимо подключить *OpenOCD* к отладочному интерфейсу реального процессора. Это можно сделать, например, через интерфейс JTAG. Затем необходимо настроить *OpenOCD* на работу с виртуальным процессором, который проходит отладку, например, с процессором, эмулируемым в *QEMU* [23] или посредством Functional Safety Simulator²⁷.

Далее необходимо выполнить синхронизацию между виртуальным и реальным процессором.

Это можно сделать с помощью команды «gesume», которая позволяет продолжить выполнение процесса на виртуальном процессоре, при этом синхронизируя его с реальным процессором. Таким образом, можно проводить отладку виртуального процессора, имея возможность отслеживать его работу в реальном времени.

Важно учитывать, что для корректной синхронизации необходимо иметь правильную конфигурацию *OpenOCD* для работы с конкретным виртуальным процессором и отладочным интерфейсом реального процессора. Также необходимо учитывать особенности работы с отдельными типами процессоров и отладочных интерфейсов.

Для сборки проекта для тестирования на наличие аппаратных уязвимостей возможно использовать кроссплатформенную систему автоматической сборки *CMake*, которая позволяет создавать, тестировать и пакетировать систему сборки исходных кодов, а также свободно распространяемых компиляторов²⁸.

Фрагмент кода сборки тестовой программы с помощью *CMake* для процессора RISC-V приведен на рис. 6. Для выполнения процедуры необходимо установить *CMake* и компилятор RISC-V. Для этого можно использовать пакетный менеджер операционной системы или загрузить их с официальных сайтов.

Для запуска необходимо в терминале выполнить команды «mkdir build && cd build && cmake .. && make», после чего выполнится сборка проекта, а результат сборки загрузится в стенд и виртуальную

²² Architecture and Core Commands. https://openocd.org/doc/html/Architecture-and-Core-Commands.html#RISC_002dV-Authentication-Commands. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

²³ Verilog-Mode Help. <https://veripool.org/verilog-mode/help/>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

²⁴ Shepherd C., Markantonakis K. *Vulnerabilities analysis and attack scenarios description*. 2021. <https://exfiles.eu/wp-content/uploads/2022/07/EXFILES-D5.1-Vulnerabilities-analysis-and-attack-scenarios-description-PU-M06.pdf>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

²⁵ Wang B. *Improving and Securing Machine Learning Systems*: Ph.D. Thesis (Comput.). USA: UC Santa Barbara; 2019. P. 10–14. <https://escholarship.org/uc/item/1nv8m9nb>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

²⁶ Guo Z. *Security of Internet of Things Devices and Networks*: Ph.D. Thesis (Comput.). USA: UC Irvine; 2016. P. 1–30. <https://escholarship.org/uc/item/4rq8s4jx>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

²⁷ Spear Ch. *System Verilog for Verification: A Guide to Learning the Testbench Language Features*. Springer. 2018. https://3ec1218usm.files.wordpress.com/2016/12/book_systemverilog_for_verification.pdf. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

²⁸ Платформа Qualys [Qualys platform]. <https://www.qualys.com/solutions/pci-compliance/>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

```

delay_lms(100);
printf("linpackc test \r\n");
rtc_print_current_time();
printf("Start >> linpackc test \r\n");

rtc_print_current_time();
printf("Stop >> linpackc test \r\n");

while(1) {
    time_start = rtc_get_subsecond();
    linpackc_test();
    uint16_t real_len = read_string(test_string, TEST_STR_SIZE);
    printf("len read data = %d \r\n", real_len);

    if(real_len) {
        printf("read data = %s \r\n", test_string);
        memset(test_string, 0, TEST_STR_SIZE);
    }

    time_stop = rtc_get_subsecond();
    uint64_t runtime = (uint64_t)time_stop - (uint64_t)time_start;
    printf("runtime = %ld \r\n", (uint32_t)runtime);
    rtc_print_current_time();
}
}

```

Рис. 7. Код запуска стресс-теста для проверки поведенческого описания RISC-V

систему тестирования, код описания которой приведен на рис. 7.

Поскольку рассматривается аппаратная уязвимость в вычислительном блоке FPU, одним из вариантов выявления уязвимостей является непосредственное стресс-тестирование систем, связанных с вычислениями с плавающей точкой.

Выявление аппаратных уязвимостей через стресс-тестирование может быть достаточно сложным, непроизводительным и зависит от типа уязвимости, которую пытаются обнаружить. Однако можно выделить следующие подходы:

1. Изменение условий эксплуатации: можно использовать стресс-тестирование для выявления уязвимостей, связанных с длительной работой устройства в условиях высокой нагрузки. Например, можно увеличить количество запросов к устройству, увеличить длительность работы, изменить температуру, влажность или другие параметры эксплуатации.
2. Моделирование атак: с помощью стресс-тестирования можно моделировать атаки на устройство.
3. Проверка стойкости к перегрузкам: можно использовать стресс-тестирование для проверки стойкости устройства к перегрузкам, например, проверить, как устройство справляется с высоким трафиком или ситуацией, когда число пользователей в сети резко увеличивается.
4. Использование тестовых случайных данных: с помощью генерации тестовых случайных данных можно проверить устойчивость устройства к ошибкам в данных, например, к ошибкам в передаче данных или к ошибкам в хранении данных.

Важно понимать, что стресс-тестирование может помочь выявить только определенные аппаратные

уязвимости. Для полной проверки необходимо использовать комбинацию различных методов и тестов, а также следовать рекомендациям по безопасности производителя устройства. Развитием этой концепции является выявление уязвимостей посредством сканеров ПО.

Результатом проведенных исследований можно считать создание стенда для выявления аппаратных уязвимостей, а также технологии работы с ним, поскольку в доступной научной литературе нет четкого определения и описания шагов по созданию аналогичных аппаратных средств и разработке примеров для отработки возможных уязвимых ситуаций.

ВЫЯВЛЕНИЕ УЯЗВИМОСТЕЙ ПОСРЕДСТВОМ СКАНЕРОВ ПО

Сравнение наиболее часто применяющихся систем сканирования ПО на наличие уязвимостей приведено в таблице.

Одним из инструментов, который специализируется на поиске ошибок и уязвимостей в коде на Си, С++, С# и Java, является статический анализатор кода *PVS-Studio*, однако для более полного сканирования кода на языке Си могут потребоваться другие инструменты, такие как *Gitleaks*, *Trivy*²⁹, *Burp Suite*³⁰ и *MobSF*³¹. Приведем краткое описание этих инструментов и их возможностей для обнаружения уязвимостей в коде на языке Си.

²⁹ <https://trivy.dev/>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

³⁰ <https://portswigger.net/burp>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

³¹ <https://github.com/MobSF/Mobile-Security-Framework-MobSF>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

Таблица. Сравнение различных систем сканирования ПО на наличие уязвимостей

№	Наименование сканера	Открытый код	Поддержка Си/C++	Основное предназначение
1	<i>Sn1per</i> ³²	нет	нет	Используется для сканирования уязвимостей в веб-приложениях, портах и сетевых устройствах. Поддерживает сканирование на основе перебора словаря и позволяет настраивать различные параметры сканирования
2	<i>Wapiti</i> ³³	да	нет	Сканер уязвимостей для веб-приложений, который имеет открытый исходный код и может выполнять автоматический поиск уязвимостей в различных частях веб-приложения, таких как параметры URL, формы, заголовки и скрипты
3	<i>Nikto</i> ³⁴	да	нет	Осуществляет поиск уязвимостей на основе баз данных и расширяемых скриптов. Позволяет сканировать различные уязвимости, такие как XSS ³⁵ , SQL-инъекции, подделку заголовков, несанкционированный доступ и др.
4	<i>OWASP ZAP</i> ³⁶	да	нет	Предоставляет возможность сканирования автоматически или вручную, а также проведения тестов на проникновение. Используется для поиска уязвимостей, таких как SQL-инъекции, XSS, CSRF ³⁷ , некорректная авторизация и др.
5	<i>Sqlmap</i> ³⁸	да	нет	Инструмент для автоматического сканирования уязвимостей SQL-инъекций в веб-приложениях. Поддерживает множество баз данных, включая <i>MySQL</i> , <i>Oracle</i> , <i>PostgreSQL</i> , <i>Microsoft SQL Server</i> и др.
6	<i>Acunetix WVS</i> ³⁹	нет	нет	Инструмент для сканирования уязвимостей в веб-приложениях, который предоставляет возможность сканирования автоматически или вручную. Поддерживает обнаружение уязвимостей, таких как XSS, SQL-инъекции, утечки информации, нарушение безопасности файлов и др.
7	<i>Vega</i> ⁴⁰	да	нет	Инструмент для сканирования уязвимостей в веб-приложениях. Поддерживает сканирование на основе перебора словаря и предоставляет возможность проведения тестов на проникновение. Позволяет обнаруживать уязвимости, такие как XSS, SQL-инъекции
8	<i>PVS-Studio</i> ⁴¹	нет	да	Статический анализатор кода на Си, C++, C# и Java, предназначенный для поиска ошибок и уязвимостей
9	<i>Gitleaks</i> ⁴²	нет	да	Инструмент для сканирования открытых репозиториях Git на наличие конфиденциальной информации и других уязвимостей безопасности. Работает путем анализа исходного кода, коммитов и истории изменений в репозитории на предмет наличия строк кода, содержащих конфиденциальную информацию, такую как пароли, ключи SSH ⁴³ , токены доступа, секреты API
10	<i>QARK</i> ⁴⁴	да	нет	Сканер приложений на Java для Android и iOS

³² <https://github.com/1N3/Sn1per/releases>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

³³ <https://pypi.org/project/wapiti3/> (in Russ.). Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

³⁴ <https://github.com/sullo/nikto>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

³⁵ XSS, cross-site scripting – межсайтовый скриптинг.

³⁶ <https://www.zaproxy.org/docs/>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

³⁷ CSRF, cross-site request forgery – межсайтовая подделка запроса.

³⁸ <https://sqlmap.org/>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

³⁹ <https://allsoft.ru/software/vendors/acunetix/acunetix-web-vulnerability-scanner/> (in Russ.). Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

⁴⁰ <https://subgraph.com/vega/>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

⁴¹ <https://pvs-studio.ru/ru/pvs-studio/> (in Russ.). Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

⁴² <https://github.com/gitleaks/gitleaks>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

⁴³ SSH, secure shell – безопасная оболочка.

⁴⁴ <https://github.com/linkedin/qark>. Дата обращения 15.05.2023. / Accessed May 15, 2023.

1. *Gitleaks* – инструмент для поиска конфиденциальных данных в Git-репозиториях, который может быть использован для сканирования кода на языке Си, хранящегося в Git.
2. *Trivy* – инструмент для сканирования контейнеров и образов Docker на наличие уязвимостей в используемых пакетах и зависимостях. Может использоваться для сканирования Docker-образов, содержащих код на языке Си.
3. *Burp Suite* – популярный инструмент для тестирования безопасности веб-приложений, который может использоваться для сканирования веб-приложений, написанных на языке Си.
4. *MobSF* – инструмент для сканирования мобильных приложений на наличие уязвимостей, который может использоваться для сканирования мобильных приложений, написанных на языке Си (например, с помощью Native Development Kit).

Каждый из этих инструментов предназначен для обнаружения уязвимостей в различных областях, и в сочетании они могут обеспечить более полное покрытие безопасности кода.

Однако следует отметить, что большинство сканеров из списка могут использоваться для сканирования кода на различных языках программирования, включая Си, но в зависимости от конкретных потребностей и типа уязвимостей, которые необходимо обнаружить, возможно, потребуется использовать сочетание нескольких инструментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что предложенный подход на основе систем сканирования и полунатурного моделирования успешно выявляет аппаратные уязвимости цифровых систем в тех случаях, когда другие методы оказались неэффективными, а анализ результатов трудно интерпретируется. Только в синтетическом эксперименте с помощью полунатурного моделирования удалось сузить область поиска и идентифицировать систему со встроенным вредоносным кодом с уязвимостью. Результаты экспериментов позволили выработать методологию и определить набор инструментов для выявления уязвимых мест цифровых устройств вычислительных систем, а также создать библиотеку готовых решений для реализации оптимального решения.

Полученные результаты и разработанный стенд для проведения экспериментов могут

использоваться в перспективных проектах по созданию цифровых устройств на современной элементной базе с возможностью перехода на новые технологии в части выявления аппаратных уязвимостей, т.к. безопасность аппаратного обеспечения необходимо рассматривать как приоритетную задачу в различных отраслях и сферах деятельности, а обнаружение и устранение уязвимостей цифровых компонентов устройств должны проводиться как на ранних этапах разработки, так и на этапе эксплуатации систем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание для университетов № ФГФЗ-2023-0005) и с применением оборудования Центра коллективного пользования РТУ МИРЭА (соглашение от 01.09.2021 № 075-15-2021-689, уникальный идентификационный номер 2296.61321X0010).

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State task for universities No. FGFZ-2023-0005) and using the equipment of the Center for Collective Use of RTU MIREA (agreement dated September 01, 2021, No. 075-15-2021-689, unique identification number 2296.61321X0010).

Вклад авторов

Е.Ф. Певцов – идея исследования, консультации по вопросам исследования, написание текста статьи.

Т.А. Деменкова – идея исследования, планирование исследования, научное редактирование статьи.

А.О. Индришенок – идея исследования, проведение исследования, написание текста статьи, интерпретация и обобщение результатов.

В.В. Филимонов – консультации по вопросам исследования, написание текста статьи.

Authors' contributions

E.F. Pevtsov – the research idea, consultations on research issues, writing the text of the article.

T.A. Demenkova – the research idea, research planning, scientific editing of the article.

A.O. Indrishenok – the research idea, conducting research, writing the text of the article, interpretation and generalization of the results.

V.V. Filimonov – consultations on research issues, writing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smetana D. FPGA-Enabled Trusted Boot Is Part of Building Security into Every Aspect of Trusted Computing Architectures. *Military & Aerospace Electronics Journal*. September 25, 2019. URL: <https://www.militaryaerospace.com/trusted-computing/article/14040672/trustedcomputing-embedded-computing-realworld>
2. Сесин И.Ю., Болбаков Р.Г. Сравнительный анализ методов оптимизации программного обеспечения для борьбы с предикацией ветвлений на графических процессорах. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):7–15. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-7-15>
3. Shayan M., Basu K., Karri R. Hardware Trojans Inspired Hardware IP Watermarks. *IEEE Design & Test*. 2019;36(6):72–79. <https://doi.org/10.1109/MDAT.2019.2929116>
4. Hennessy J.L., Patterson D.A. A new golden age for computer architecture: Domain-specific hardware/software co-design, enhanced security, open instruction sets, and agile chip development. In: *Proceedings of the 2018 ACM/IEEE 45th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA)*. IEEE; 2018. <https://doi.org/10.1109/ISCA.2018.00011>
5. Li D., Zhang Q., Zhao D., Li L., He J., Yuan Y., Zhao Y. Hardware Trojan Detection Using Effective Property-Checking Method. *Electronics*. 2022;11(17):2649. <https://doi.org/10.3390/electronics11172649>
6. Алехин В.А. Проектирование электронных систем с использованием SystemC и SystemC–AMS. *Russ. Technol. J.* 2020;8(4):79–95. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-79-95>
7. Yang K., Zhang K., Ren J., Shen X. Security and privacy in mobile crowdsourcing: Challenges and opportunities. *IEEE Commun. Mag.* 2015;53(8):75–81. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7180511>
8. Lou X., Zhang T., Jiang J., Zhang Y. *A Survey of Microarchitectural Side-channel Vulnerabilities, Attacks and Defenses in Cryptography*. Vol. 1. No. 1. March 2021. URL: <https://arxiv.org/pdf/2103.14244>
9. Skorobogatov S., Woods C. Breakthrough Silicon Scanning Discovers Backdoor in Military Chip. In: Prouff E., Schaumont P. (Eds.). *Cryptographic Hardware and Embedded Systems – CHES 2012. Lecture Notes in Computer Science*. 2012. V. 7428. Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33027-8_2
10. Tasiran S., Keutzer K. Coverage metrics for functional validation of hardware designs. *IEEE Des. Test. Comput.* 2001;18(4):36–45. <https://doi.org/10.1109/54.936247>
11. Mukhopadhyay D., Chakraborty R.S. *Hardware Security: Design, Threats, and Safeguards*. CRC Press; 2014. 542 p. ISBN 978-1-4398-9584-9
12. Тарасов И.Е. *ПЛИС Xilinx. Языки описания аппаратуры VHDL и Verilog, САПР, приемы проектирования*. М.: Горячая линия – Телеком; 2024. 538 с. ISBN 978-5-9912-0802-4
13. Turkington K., Masseios K., Constantinides G.A., Leong P. FPGA Based Acceleration of the Linpack Benchmark: A High Level Code Transformation Approach. In: *2006 International Conference on Field Programmable Logic and Applications*. IEEE; 2007. <https://doi.org/10.1109/FPL.2006.311240>
14. Tamuly S., Joseph A., Chandrasekharan J. Deep Learning Model for Image Classification. In: Smys S., Tavares J., Balas V., Pliyasu A. (Eds.). *Computational Vision and Bio-Inspired Computing. ICCVVIC 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham; 2019. V. 1108. P. 312–320. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37218-7_36
15. Majeric F., Gonzalvo B., Bossuet L. JTAG Fault Injection Attack. *IEEE Embed. Syst. Lett.* 2018;10(3):65–68. <https://doi.org/10.1109/LES.2017.2771206>
16. Abdalrhag B., Awad A., Hawash A. A fast Binary Decision Diagram (BDD)-based reversible logic optimization engine driven by recent meta-heuristic reordering algorithms. *Microelectron. Reliab.* 2021;123:114168. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114168>
17. Певцов Е.Ф., Деменкова Т.А., Шнякин А.А. Тестопригодное проектирование интегральных схем и проблемы защиты проектов. *Russ. Technol. J.* 2019;7(4):60–70. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-60-70>
18. Куо М.-Н., Hu Ch.-М., Lee K.-J. Time-Related Hardware Trojan Attacks on Processor Cores. In: *IEEE International Test Conference in Asia (ITC-Asia)*. IEEE; 2019. <https://doi.org/10.1109/ITC-Asia.2019.00021>
19. Комолов Д., Золотуха Р. Использование микросхем специальной памяти для обеспечения защиты ПЛИС FPGA от копирования. *Компоненты и технологии*. 2008;12:24–26. URL: https://kit-e.ru/wp-content/uploads/2008_12_24.pdf
20. Becker A., Hu W., Tai Y., Brisk P., Kastner R., Ienne P. Arbitrary Precision and Complexity Tradeoffs for Gate-Level Information Flow Tracking. In: *Proceedings of the 54th ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference (DAC)*. IEEE, 2017. Part 128280. <https://doi.org/10.1145/3061639.3062203>
21. Polychronou N.F., Thevenon P.H., Puys M., Beroulle V. A Comprehensive Survey of Attacks without Physical Access Targeting Hardware Vulnerabilities in IoT/IIoT Devices, and Their Detection Mechanisms. *ACM Trans. Design Automat. Electron. Syst.* 2022;27(1):1–35. <https://doi.org/10.1145/3471936>
22. Erata F., Deng Sh., Zaghoul F., Xiong W., Demir O., Szefer J. Survey of Approaches and Techniques for Security Verification of Computer Systems. *ACM J. Emerg. Technol. Comput. Syst.* 2022;1(1):Article 1. <https://doi.org/10.1145/3564785>
23. Yang X., Zhao D., Jiang Y., Zhang X., Yuan Y. Fault Simulation and Formal Analysis in Functional Safety CPU FMEDA Campaign. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021;1769:012061. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1769/1/012061>

REFERENCES

1. Smetana D. FPGA-Enabled Trusted Boot Is Part of Building Security into Every Aspect of Trusted Computing Architectures. *Military & Aerospace Electronics Journal*. September 25, 2019. Available from URL: <https://www.militaryaerospace.com/trusted-computing/article/14040672/trustedcomputing-embedded-computing-realworld>
2. Sesin I.Yu., Bolbakov R.G. Comparative analysis of software optimization methods in context of branch predication on GPUs. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):7–15 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-7-15>
3. Shayan M., Basu K., Karri R. Hardware Trojans Inspired Hardware IP Watermarks. *IEEE Design & Test*. 2019;36(6):72–79. <https://doi.org/10.1109/MDAT.2019.2929116>
4. Hennessy J.L., Patterson D.A. A new golden age for computer architecture: Domain-specific hardware/software co-design, enhanced security, open instruction sets, and agile chip development. In: *Proceedings of the 2018 ACM/IEEE 45th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA)*. IEEE; 2018. <https://doi.org/10.1109/ISCA.2018.00011>
5. Li D., Zhang Q., Zhao D., Li L., He J., Yuan Y., Zhao Y. Hardware Trojan Detection Using Effective Property-Checking Method. *Electronics*. 2022;11(17):2649. <https://doi.org/10.3390/electronics11172649>
6. Alekhin V.A. Designing electronic systems using SystemC and SystemC-AMS. *Russ. Technol. J.* 2020;8(4):79–95 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-79-95>
7. Yang K., Zhang K., Ren J., Shen X. Security and privacy in mobile crowdsourcing: Challenges and opportunities. *IEEE Commun. Mag.* 2015;53(8):75–81. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7180511>
8. Lou X., Zhang T., Jiang J., Zhang Y. *A Survey of Microarchitectural Side-channel Vulnerabilities, Attacks and Defenses in Cryptography*. Vol. 1. No. 1. March 2021. Available from URL: <https://arxiv.org/pdf/2103.14244>
9. Skorobogatov S., Woods C. Breakthrough Silicon Scanning Discovers Backdoor in Military Chip. In: Prouff E., Schaumont P. (Eds.). *Cryptographic Hardware and Embedded Systems – CHES 2012. Lecture Notes in Computer Science*. 2012. V. 7428. Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33027-8_2
10. Tasiran S., Keutzer K. Coverage metrics for functional validation of hardware designs. *IEEE Des. Test. Comput.* 2001;18(4):36–45. <https://doi.org/10.1109/54.936247>
11. Mukhopadhyay D., Chakraborty R.S. *Hardware Security: Design, Threats, and Safeguards*. CRC Press; 2014. 542 p. ISBN 978-1-4398-9584-9
12. Tarasov I.E. *PLIS Xilinx. Yazyki opisaniya apparatury VHDL i Verilog, SAPR, priemy proektirovaniya (FPGA Xilinx. Hardware Description Languages VHDL and Verilog, CAD, Design Techniques)*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2024. 538 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9912-0802-4
13. Turkington K., Maseios K., Constantinides G.A., Leong P. FPGA Based Acceleration of the Linpack Benchmark: A High Level Code Transformation Approach. In: *2006 International Conference on Field Programmable Logic and Applications*. IEEE; 2007. INSPEC Accession Number: 9604301. <https://doi.org/10.1109/FPL.2006.311240>
14. Tamuly S., Joseph A., Chandrasekharan J. Deep Learning Model for Image Classification. In: Smys S., Tavares J., Balas V., Iliyasa A. (Eds.). *Computational Vision and Bio-Inspired Computing, ICCVBIC 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham; 2019. V. 1108. P. 312–320. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37218-7_36
15. Majeric F., Gonzalvo B., Bossuet L. JTAG Fault Injection Attack. *IEEE Embed. Syst. Lett.* 2018;10(3):65–68. <https://doi.org/10.1109/LES.2017.2771206>
16. Abdalhag B., Awad A., Hawash A. A fast Binary Decision Diagram (BDD)-based reversible logic optimization engine driven by recent meta-heuristic reordering algorithms. *Microelectron. Reliab.* 2021;123:114168. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114168>
17. Pevtsov E.F., Demenkova T.A., Shnyakin A.A. Design for Testability of Integrated Circuits and Project Protection Difficulties. *Russ. Technol. J.* 2019;7(4):60–70 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-60-70>
18. Kuo M.-H., Hu Ch.-M., Lee K.-J. Time-Related Hardware Trojan Attacks on Processor Cores. In: *IEEE International Test Conference in Asia (ITC-Asia)*. IEEE; 2019. <https://doi.org/10.1109/ITC-Asia.2019.00021>
19. Komolov D., Zolotukho R. Using special memory chips to ensure FPGA copy protection. *Komponenty i tekhnologii = Components & Technologies*. 2008;12:24–26 (in Russ.). Available from URL: https://kit-e.ru/wp-content/uploads/2008_12_24.pdf
20. Becker A., Hu W., Tai Y., Brisk P., Kastner R., Jenne P. Arbitrary Precision and Complexity Tradeoffs for Gate-Level Information Flow Tracking. In: *Proceedings of the 54th ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference (DAC)*. IEEE, 2017. Part 128280. <https://doi.org/10.1145/3061639.3062203>
21. Polychronou N.F., Thevenon P.H., Puy M., Berouille V. A Comprehensive Survey of Attacks without Physical Access Targeting Hardware Vulnerabilities in IoT/IIoT Devices, and Their Detection Mechanisms. *ACM Trans. Design Automat. Electron. Syst.* 2022;27(1):1–35. <https://doi.org/10.1145/3471936>
22. Erata F., Deng Sh., Zaghloul F., Xiong W., Demir O., Szefer J. Survey of Approaches and Techniques for Security Verification of Computer Systems. *ACM J. Emerg. Technol. Comput. Syst.* 2022;1(1):Article 1. <https://doi.org/10.1145/3564785>
23. Yang X., Zhao D., Jiang Y., Zhang X., Yuan Y. Fault Simulation and Formal Analysis in Functional Safety CPU FMEDA Campaign. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021;1769:012061. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1769/1/012061>

Об авторах

Певцов Евгений Филиппович, к.т.н., директор структурного подразделения «Центр проектирования интегральных схем, устройств наноэлектроники и микросистем», ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: pevtsov@mirea.ru. Scopus Author ID 6602652601. ResearcherID M-2709-2016, SPIN-код РИНЦ 1410-2483, <http://orcid.org/0000-0001-6264-1231>

Деменкова Татьяна Александровна, к.т.н., доцент, кафедра вычислительной техники, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: demenkova@mirea.ru. Scopus Author ID 57192958412, ResearcherID AAB-3937-2020, SPIN-код РИНЦ 3424-7489, <http://orcid.org/0000-0003-3519-6683>

Индришенок Александр Олегович, аспирант, кафедра вычислительной техники, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: indrishenoksasha@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 2308-7140, <http://orcid.org/0000-0003-1471-9043>

Филимонов Владимир Викторович, старший преподаватель, кафедра физики и технической механики, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: filimonov@mirea.ru. Scopus Author ID 7102525379, <http://orcid.org/0000-0003-1118-6608>

About the authors

Evgeniy F. Pevtsov, Cand. Sci. (Eng.), Director of Center for the Design of Integrated Circuits, Nanoelectronics Devices and Microsystems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: pevtsov@mirea.ru. Scopus Author ID 6602652601. ResearcherID M-2709-2016, RSCI SPIN-code 1410-2483, <http://orcid.org/0000-0001-6264-1231>

Tatyana A. Demenkova, Cand. Sci. (Eng.), Associated Professor, Computer Technology Department, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: demenkova@mirea.ru. Scopus Author ID 57192958412, ResearcherID AAB-3937-2020, RSCI SPIN-code 3424-7489, <http://orcid.org/0000-0003-3519-6683>

Alexander O. Indrishenok, Postgraduate Student, Computer Technology Department, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: indrishenoksasha@mail.ru. RSCI SPIN-code 2308-7140, <http://orcid.org/0000-0003-1471-9043>

Vladimir V. Filimonov, Senior Lecturer, Department of Physics and Technical Mechanics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: filimonov@mirea.ru. Scopus Author ID 7102525379. <http://orcid.org/0000-0003-1118-6608>

Роботизированные комплексы и системы.
Технологии дистанционного зондирования неразрушающего контроля
Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing

УДК 004.31

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-40-50>

EDN ECAQGY



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Расчет основных эксплуатационных характеристик привязной высотной системы корабельного базирования

И.И. Давлюд[®]

Балтийское высшее военно-морское училище имени Ф.Ф. Ушакова, Калининград, 236022 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: sawefew2@yandex.ru

Резюме

Цели. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) активно применяются во многих военных и гражданских областях: мониторинг критических объектов, телекоммуникации, радиолокация, фото- и видеосъемка, картографирование и др. Основным недостатком автономных БПЛА является ограниченное время функционирования. Длительное функционирование БПЛА на кораблях могут обеспечить привязные высотные системы (ПВС), в которых электропитание двигателей и аппаратуры полезной нагрузки осуществляется от бортового источника энергии по тонкому кабель-тросу. Цель работы – выбор и обоснование облика ПВС, расчет необходимых эксплуатационных характеристик.

Методы. В работе используются методы системного и функционального анализа параметров привязной системы, методы и модели теории отношений и измерения.

Результаты. Рассмотрены вопросы проектирования и реализации нового поколения ПВС корабельного базирования. На основе существующих привязных платформ определен рациональный тип аэродинамической схемы БПЛА. Определена и обоснована оптимальная архитектура привязной системы, представлен ее облик и решение по размещению на корабле, а также описана ее работа. Выбраны и рассчитаны основные исходные параметры для проектирования высотных систем, такие как взлетная масса, оптимальная высота подъема, максимальная необходимая мощность для функционирования, структура системы передачи энергии, время развертывания и подъема на расчетную высоту.

Выводы. Представленная в статье методология расчета необходимых характеристик позволяет использовать ее для разработки и оценки ПВС. Данные системы способны выполнять различный спектр задач, при этом не требуя отдельного места хранения и запуска, что особенно актуально в корабельных условиях. Представленная система имеет значительные преимущества перед известными аналогами.

Ключевые слова: привязная высотная платформа, беспилотный аппарат, мощность, передача энергии, кабель, транспортно-пусковой контейнер

• Поступила: 23.11.2023 • Доработана: 04.03.2024 • Принята к опубликованию: 24.05.2024

Для цитирования: Давлюд И.И. Расчет основных эксплуатационных характеристик привязной высотной системы корабельного базирования. *Russ. Technol. J.* 2024; 12(4):40–50. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-40-50>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Calculation of the main operational characteristics of a tethered high-altitude ship-based system

Igor I. Dawlyud[®]

Admiral F.F. Ushakov Baltic Higher Naval School, Kaliningrad, 236022 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: sawefew2@yandex.ru

Abstract

Objectives. Currently, UAVs are actively used in many military and civilian fields such as object surveillance, telecommunications, radar, photography, video recording, and mapping, etc. The main disadvantage of autonomous UAVs is their limited operating time. The long-term operation of UAVs on ships can be ensured by tethered high-altitude systems in which the power supply of engines and equipment is provided from the onboard energy source through a thin cable tether. This paper aims to select and justify the appearance of such system, as well as to calculate the required performance characteristics.

Methods. The study used methods of systemic and functional analysis of tethered system parameters, as well as methods and models of the theory of relations and measurement.

Results. The issues of design and implementation of new generation tethered high-altitude ship-based systems were considered. A rational type of aerodynamic design for unmanned aerial vehicles was determined based on existing tethered platforms. The optimal architecture of the tethered system was defined and justified. The paper presents the appearance and solution for placement onboard the ship, and describes its operation. The main initial parameters for designing high-altitude systems such as take-off weight, optimal lift altitude, maximum power required for operation, structure of the energy transfer system, as well as deployment and lift time to the design altitude were selected and calculated.

Conclusions. The methodology for calculating the necessary characteristics described in the paper can be used for developing and evaluating tethered high-altitude systems. These systems are capable of performing a wide range of tasks, without requiring a separate storage and launch location, which is especially important in the ship environment. The system presented herein possesses significant advantages over well-known analogues.

Keywords: tethered high-altitude platform, unmanned aerial vehicle, power, energy transfer, ship, transport and launch container

• Submitted: 23.11.2023 • Revised: 04.03.2024 • Accepted: 24.05.2024

For citation: Dawlyud I.I. Calculation of the main operational characteristics of a tethered high-altitude ship-based system. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):40–50. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-40-50>

Financial disclosure: The author has no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение и интенсивное развитие получили беспилотные летательные аппараты (БПЛА) многороторного типа. БПЛА обладают массой неоспоримых достоинств – это простые и недорогие конструкции, в отличие от больших авиаконструкций; безопасность и неприхотливость в обслуживании; отсутствие необходимости в специальных стартовых площадках; оперативность. Основным недостатком БПЛА является малая (ограниченная) автономность полета, связанная с недостаточной

емкостью аккумуляторов БПЛА, оснащенных электродвигателями [1].

Длительное функционирование БПЛА можно обеспечить непрерывной подачей напряжения питания с помощью привязных высотных систем (ПВС). В таких системах передача энергии высокой мощности на БПЛА и его удержание на определенной высоте осуществляются с помощью тонкого кабельтроса [2]. Вместе с этим, ПВС обеспечивает возможность точной посадки БПЛА в назначенное место, что может быть использовано в местах с различными преградами (препятствиями), например, на палубе корабля.

В Военно-морском флоте (ВМФ) ПВС используются для организации видеонаблюдения, целеуказания, организации связи, радиоэлектронной борьбы и т.д. Однако массовое использование ПВС на кораблях в настоящее время затруднено ввиду отсутствия специализированных мест хранения, а также простых и надежных средств запуска и посадки [3].

РАЗРАБОТКА ОБЛИКА И РАСЧЕТ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПВС

Разработка ПВС корабельного базирования требует проведения комплекса работ:

- определение архитектуры функционирования, облика, места хранения и запуска ПВС;
- расчет основных тактико-эксплуатационных характеристик;
- расчет параметров устойчивости к внешним возмущающим воздействиям.

В настоящее время в ВМФ проводится работа по поиску оптимального размещения на кораблях мест хранения, взлета и посадки ПВС, а также средств, обеспечивающих их эксплуатацию. В большинстве случаев это связано с необходимостью значительного изменения внешней и внутренней архитектуры корабля с целью поиска необходимых площадей [3]. Такой подход является неприемлемым для боевого корабля, поскольку при этом возможны существенные изменения его эксплуатационных и технических характеристик. Поэтому решение задачи хранения, взлета и посадки ПВС должно сводиться к необходимости поиска иных способов с применением специальных средств.

С точки зрения архитектуры перспективная ПВС представляет собой систему, состоящую из воздушного (БПЛА) и корабельного модулей, объединенных друг с другом гибкой связью (кабель-тросом) и размещенных в стандартном транспортно-пусковом контейнере (ТПК) для вертикальной пусковой установки корабля, находящейся под верхней палубой (рис. 1).

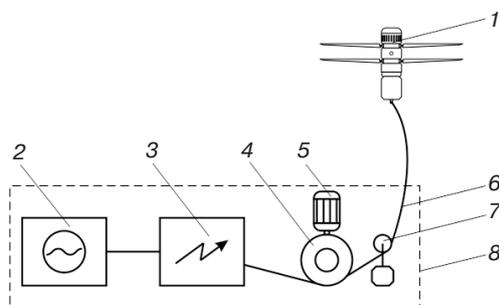


Рис. 1. Привязная высотная система корабельного базирования: 1 – воздушный модуль (БПЛА), 2 – источник переменного напряжения, 3 – преобразователь напряжения и система управления лебедкой, 4 – лебедка, 5 – привод лебедки, 6 – кабель-трос, 7 – датчик натяжения кабель-троса, 8 – корабельный модуль

Беспилотный летательный аппарат удерживает установленную на его борту полезную нагрузку в заданной точке над уровнем моря. Механическая связь БПЛА с корабельным модулем осуществляется посредством кабель-троса. В состав корабельного модуля входит источник переменного напряжения, преобразователь напряжения и система управления лебедкой, лебедка с приводом и датчик натяжения кабель-троса. Облик ПВС, размещенной в ТПК, представлен на рис. 2.

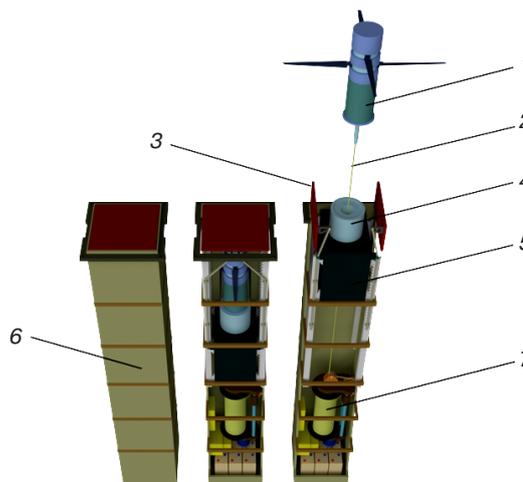


Рис. 2. Внешний вид ПВС в ТПК: 1 – БПЛА, 2 – кабель-трос, 3 – створки крышки, 4 – стакан, 5 – тумба, 6 – ТПК, 7 – лебедка

При выборе типа БПЛА следует учитывать условия эксплуатации и особенности его работы [4]. Зависимость пространственной ориентации БПЛА от силы и направления ветровой нагрузки должна быть сведена к минимуму. Поэтому для ПВС возможно использование трех аэродинамических схем: одновинтовая с несколькими рулевыми устройствами (рулевыми винтами), симметрично расположенными относительно оси несущего винта; соосная; мультироторная с четырьмя и более винтами, симметрично расположенными относительно центра БПЛА.

Все типы БПЛА имеют свои особенности и недостатки, однако, несмотря на относительную сложность конструкции, в ПВС выбрана соосная схема. Ее курсовая ориентация незначительно зависит от направления ветра, такой тип БПЛА проще хранить и запускать из контейнера, что является рациональным решением в заданных условиях.

Основными исходными расчетными параметрами при разработке ПВС являются:

- взлетная масса БПЛА, которая включает массу самого БПЛА, массу полезной нагрузки, массу кабель-троса;
- оптимальная высота подъема БПЛА;
- максимальная необходимая мощность для функционирования БПЛА;

- структура системы передачи энергии на БПЛА;
- время развертывания и подъема БПЛА на установленную высоту.

ПВС работает следующим образом. В базе хранения на БПЛА устанавливают необходимую для выполнения конкретных задач полезную нагрузку. В корабельную вертикальную пусковую установку (рис. 2) загружают ТПК. Перед использованием устройства открывают крышку корабельной вертикальной пусковой установки. Затем с помощью привода открывают створки крышки ТПК, после чего поднимается стакан, жестко закрепленный на тумбе.

После подъема тумбы в крайнее верхнее положение запускаются винты БПЛА, приводимые в движение как минимум двумя электродвигателями, получающими питание по кабель-тросу. БПЛА начинает вертикальный подъем. Система управления формирует необходимое напряжение для привода лебедки, которая, вращаясь, разматывает кабель-трос, соединенный со штырем БПЛА через датчик натяжения, систему роликов и кабелеукладчик. Датчик натяжения необходим для поддержания установленной силы натяжения кабель-троса и предотвращения аварийных ситуаций посредством выработки сигналов для системы управления. Во время функционирования (подъема и зависания на определенной высоте) на БПЛА по кабель-тросу подается высокое напряжение питания от системы управления, которое снижается бортовым преобразователем до нужной величины для функционирования самого БПЛА и установленной на нем полезной нагрузки.

После набора высоты БПЛА стабилизируется относительно горизонта и курса с заданной точностью и удерживается в этом положении в процессе всей работы. Стабилизация БПЛА во время работы осуществляется автоматически с помощью системы датчиков: гироскопа, акселерометра, барометрического высотомера (альтиметра), трехкомпонентного магнитометра. Законы управления формируются с помощью микропроцессора и позволяют осуществлять стабилизацию курса, крена и тангажа, а также противостоять возмущающим воздействиям ветра. Компенсация сноса БПЛА из-за ветра или движения корабля осуществляется с помощью приемника глобальной навигационной системы и акселерометров. Компенсация вертикальных перемещений, вызванных волнением, осуществляется путем изменения длины кабель-троса по сигналам от бортовых датчиков и системы управления.

При аварийной ситуации или отсутствии питания с корабельного источника предусмотрено питание от аккумуляторов, расположенных в донной части ТПК. В случае обрыва кабель-троса предусмотрен автоматический режим аварийной посадки БПЛА с использованием энергии бортового аккумулятора.

Посадка БПЛА производится в обратной последовательности. При этом постоянное натяжение кабель-троса обеспечивает выравнивание БПЛА над стаканом. Развертывание, взлет, посадка и свертывание корабельной привязной высотной системы осуществляются автоматически.

ВЗЛЕТНАЯ МАССА

При проектировании ПВС важным параметром является максимальная взлетная масса БПЛА – масса БПЛА с установленной полезной нагрузкой и массой кабель-троса максимально возможной длины:

$$m_{вз} = m_{БПЛА} + m_{пн} + m_{кт} h, \quad (1)$$

где $m_{БПЛА}$ – масса БПЛА, $m_{пн}$ – масса полезной нагрузки, $m_{кт}$ – погонная масса кабель-троса, h – высота подъема БПЛА.

В формуле (1) неизвестной величиной является последнее слагаемое, которое зависит от используемого кабель-троса и высоты подъема. Кабель-трос может состоять из кабеля с несущим тросом или кабеля, отдельно прикрепленного к несущему тросу (рис. 3).



Рис. 3. Варианты кабель-тросов: (а) силовой тросовый кабель КПВЛС¹, (б) тросовый кабель УТР²

Первый вариант является предпочтительным, поскольку имеет более компактную и удобную в эксплуатации конструкцию. Технология производства кабель-троса предполагает использование в его центре силового троса в изоляции, а вокруг – изолированных проводов с медными токопроводящими жилами круглого сечения. Внешняя защитная оболочка кабель-троса состоит из изоляционного материала. Внутри внешней оболочки кабеля присутствуют пустоты, которые необходимо заполнять материалом малой плотности, чтобы придать конструкции устойчивость к смятию.

Основными материалами, используемыми при изготовлении кабель-троса, являются медь, кевлар,

¹ К – кабель контрольный, П – изоляция жил из полиэтилена, В – оболочка из поливинилхлоридного пластика, Л – лифтовой, С – с грузонесущим тросом из синтетических нитей. [C is control cable, P is polyethylene core insulation, V is polyvinyl chloride plastic sheath, L is lifting cable, and S means with load-carrying tether made of synthetic threads.]

² УТР, unshielded twisted pair – неэкранированная витая пара. [UTP is the unshielded twisted pair.]

оптоволокно, пластмассы. Погонная масса кабеля определяется по формуле:

$$m_{\text{КТ}} = \rho_{\text{к}} S_{\text{Т}} + \rho_{\text{М}} S_{\text{М}} u_{\text{М}} n + \rho_{\text{И}} S_{\text{И}} + \rho_{\text{О}} S_{\text{О}} + \rho_{\text{З}} S_{\text{З}} + \rho_{\text{ОВ}} S_{\text{ОВ}}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{к}}$, $\rho_{\text{М}}$, $\rho_{\text{И}}$, $\rho_{\text{О}}$, $\rho_{\text{З}}$, $\rho_{\text{ОВ}}$ – плотность кевлара, меди, изоляции, оболочки, материала заполнения, оптоволокна, соответственно; $u_{\text{М}}$ – коэффициент, учитывающий скрутку проволоки в токопроводящей жиле; $S_{\text{Т}}$, $S_{\text{М}}$, $S_{\text{И}}$, $S_{\text{О}}$, $S_{\text{З}}$, $S_{\text{ОВ}}$ – площади сечений троса, медной жилы, изоляции, оболочки, заполнения, оптоволокна, соответственно; n – количество медных жил.

Для дальнейших расчетов примем следующие ограничения:

- оптоволокно однородно по всему сечению;
- внешняя оболочка имеет круглое сечение;
- толщина и материал изоляций всех жил и троса одинакова;
- все жилы имеют одинаковое поперечное сечение.

Упрощенный вариант поперечного сечения кабель-троса с двумя медными жилами и оптоволоконным представлен на рис. 4.

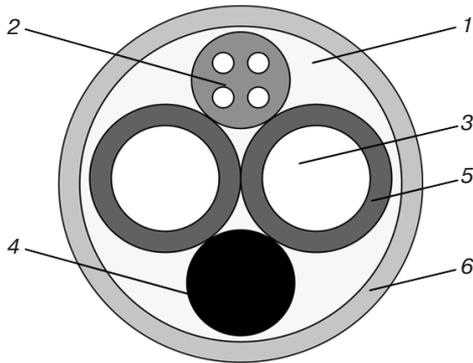


Рис. 4. Поперечный разрез кабель-троса: 1 – материал заполнения, 2 – оптоволокно, 3 – медная жила, 4 – кевларовый трос, 5 – изоляция, 6 – оболочка

Площадь изоляции $S_{\text{И}}$ находится по формуле:

$$S_{\text{И}} = 2\pi k_{\text{И}} (r_{\text{пр}} - k_{\text{И}} / 2)(n + 1), \quad (3)$$

где $k_{\text{И}}$ – толщина изоляции, $r_{\text{пр}}$ – радиус проводника.

Площадь оболочки определяется:

$$S_{\text{О}} = 2\pi k_{\text{О}} (r_{\text{КТ}} - k_{\text{О}} / 2), \quad (4)$$

где $k_{\text{О}}$ – толщина оболочки, $r_{\text{КТ}}$ – радиус кабель-троса.

Радиус рассматриваемого кабель-троса находится по формуле:

$$r_{\text{КТ}} = k_{\text{О}} + 3k_{\text{И}} + 2r_{\text{М}} + r_{\text{Т}}, \quad (5)$$

где $r_{\text{Т}}$ – радиус троса, $r_{\text{М}}$ – радиус медной жилы.

Форма поперечного сечения заполняющего материала имеет сложную форму, поэтому площадь его определяется выражением:

$$S_{\text{З}} = \pi r_{\text{КТ}}^2 - \pi (r_{\text{Т}}^2 u_{\text{Т}} + r_{\text{М}}^2 u_{\text{М}} n + 2k_{\text{И}} (r_{\text{пр}} - k_{\text{И}} / 2) \times (n + 1) + r_{\text{ОВ}}^2 + 2k_{\text{О}} (r_{\text{КТ}} - k_{\text{О}} / 2)), \quad (6)$$

где $r_{\text{ОВ}}$ – радиус оптоволокна.

После преобразования выражения (6) получим:

$$S_{\text{З}} = \pi ((r_{\text{КТ}} - k_{\text{О}})^2 - ((r_{\text{Т}} + k_{\text{И}})^2 u_{\text{Т}} + r_{\text{пр}}^2 u_{\text{М}} n + r_{\text{ОВ}}^2)). \quad (7)$$

Подставив в (2) уравнения (3), (4), (7), получим:

$$m_{\text{КТ}} = \rho_{\text{к}} \pi r_{\text{КТ}}^2 + \rho_{\text{М}} \pi r_{\text{М}}^2 u_{\text{М}} n + \rho_{\text{И}} 2\pi k_{\text{И}} (r_{\text{пр}} - k_{\text{И}} / 2)(n + 1) + \rho_{\text{О}} 2\pi k_{\text{О}} (r_{\text{КТ}} - k_{\text{О}} / 2) + \rho_{\text{З}} (\pi ((r_{\text{КТ}} - k_{\text{О}})^2 - ((r_{\text{Т}} + k_{\text{И}})^2 u_{\text{Т}} + r_{\text{пр}}^2 u_{\text{М}} n + r_{\text{ОВ}}^2))) + \rho_{\text{ОВ}} \pi r_{\text{ОВ}}^2. \quad (8)$$

Полагая $r_{\text{Т}} = 0.0015$ м, $r_{\text{М}} = 0.00075$ м, $r_{\text{ОВ}} = 0.001$ м, $r_{\text{пр}} = 0.00155$ м, $k_{\text{И}} = k_{\text{О}} = 0.0008$ м, получим $m_{\text{КТ}} = 0.09$ кг. Таким образом, при высоте 100 м масса БПЛА с кабель-тросом увеличится на 9 кг.

ОПТИМАЛЬНАЯ ВЫСОТА ПОДЪЕМА БПЛА

От высоты подъема БПЛА напрямую зависит эффективность функционирования подвешенного оборудования ПВС: чем больше высота – тем больше обзор.

Предельная дальность радиолокации ограничена прямой видимостью до цели, значение которой (в км) определяется известной формулой (вывод из основной формулы радиолокации [5]):

$$L_{\text{max}} \approx 4.12 (\sqrt{h_{\text{а}}} + \sqrt{h_{\text{ц}}}), \quad (9)$$

где $h_{\text{а}}$ – высота антенны (высота подъема БПЛА), $h_{\text{ц}}$ – высота цели.

При высоте цели $h_{\text{ц}} = 0$ (например, малоразмерная надводная цель) и наблюдении с верхней палубы корабля ($h_{\text{а}} \approx 10$ м) дальность обнаружения составит $L_{\text{max}} \approx 13$ км. Однако при подъеме средств наблюдения на высоту $h_{\text{а}} \approx 100$ м предельная дальность возрастает более чем в 3 раза: $L_{\text{max}} \approx 41$ км. Зависимость дальности видимости горизонта от высоты наблюдения представлена на рис. 5.

Однако при увеличении высоты подъема БПЛА увеличивается потребляемая им мощность, а также скорость ветра [6]. Сравнивая результаты моделирования условий применения ПВС [7, 8], можно сделать вывод, что рациональная высота подъема составляет около 100 м.

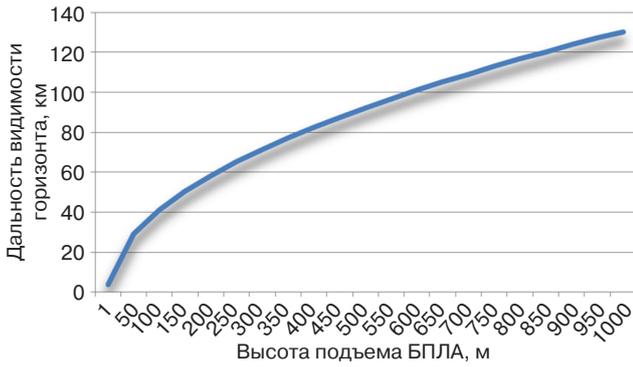


Рис. 5. Зависимость дальности видимости горизонта от высоты наблюдения

МАКСИМАЛЬНАЯ НЕОБХОДИМАЯ МОЩНОСТЬ ДЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БПЛА

На рис. 6 представлен подвесной БПЛА и действующие на него силы: F_g – сила тяжести, F_T – сила тяги двигателей БПЛА, $F_{св}$ – сила сопротивления ветру, $F_{кт}$ – сила натяжения кабель-троса.

Модуль всех сил, действующих на БПЛА, рассчитывается по формуле [6]:

$$|F_T| = \sqrt{(|F_g| + |F_{кт}| \cos \alpha)^2 + (|F_{св}| + |F_{кт}| \sin \alpha)^2}, \quad (10)$$

где α – угол вектора силы натяжения кабель-троса к вертикали.

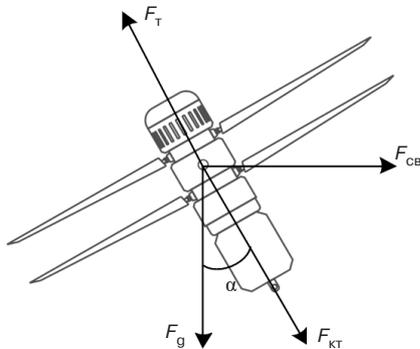


Рис. 6. БПЛА с действующими на него силами

Сила тяжести определяется взлетным весом БПЛА:

$$F_g = m_{\text{БПЛА}} g + m_{\text{пн}} g + m_{\text{кт}} g, \quad (11)$$

где g – ускорение свободного падения.

Сила сопротивления ветра находится по формуле³:

$$F_{св} = C \rho S v^2 = C q S, \quad (12)$$

где C – аэродинамический коэффициент, S – проекция площади БПЛА на направление, перпендикулярное

³ ОСТ 92-9249-80. Отраслевой стандарт. *Агрегаты специального назначения. Методика расчета ветровых нагрузок.* 1980. [OST 92-9249-80. Industry standard. *Units of special purpose. Calculation methodology for wind loads.* 1980 (in Russ.).]

набегающему потоку, v – скорость набегающего воздушного потока, ρ – плотность воздуха, q – ветровой напор.

Как следует из (12), для определения ветровых нагрузок необходимо знать геометрические характеристики БПЛА, скоростной напор и аэродинамический коэффициент. Геометрические характеристики и аэродинамический коэффициент являются известными величинами.

Рассмотрим аэродинамические нагрузки при ветровом воздействии: рабочие и предельные. При рабочем ветровом воздействии допускается эксплуатация БПЛА без ограничительных условий. При предельном ветровом воздействии БПЛА должен сохранять прочность, устойчивость и обеспечивать другие эксплуатационные требования.

Задаваемыми параметрами при рабочем ветровом воздействии являются расчетная максимальная величина средней (с двухминутным периодом осреднения) скорости ветра на высоте 10 м от поверхности земли и минимальная температура окружающей среды, при которых допускается эксплуатация БПЛА.

Расчетный скоростной напор при рабочем воздействии определяется по формуле:

$$q_p = \frac{\rho v_p^2}{2}, \quad (13)$$

где v_p – расчетная средняя скорость ветра при рабочем воздействии.

При расчете ветровой нагрузки на движущемся корабле необходимо учитывать скорость его передвижения, если она превышает $0.025 v_p$. В таком случае для заданной средней скорости ветра расчетный скоростной напор при движении против ветра определяется по формуле:

$$q_p = \frac{\rho (v_p + v_{\text{max}})^2}{2}, \quad (14)$$

где v_{max} – максимальная скорость движения корабля.

По предельной величине нормативного среднего скоростного напора q_n определяется расчетный скоростной напор для предельного ветрового воздействия:

$$q_p = q_n \mu, \quad (15)$$

где μ – коэффициент перегрузки, принимаемый равным 1.0–1.3.

Коэффициент C_i зависит от угла α , направления ветра и профиля БПЛА⁴.

Мощность двигателей, необходимая для удержания БПЛА в заданной точке, после определения модуля результирующей силы, рассчитывается по формуле:

⁴ Albisser M. *Identification of Aerodynamic Coefficients from Free-Flight Data.* Université de Lorraine, Nancy, France, Ph.D. Thesis, 2015.

$$P = \frac{|\mathbf{F}_T|}{k \times g}, \quad (16)$$

где $|\mathbf{F}_T|/g$ – суммарная тяга двигателей БПЛА; k – коэффициент эффективности винтомоторной группы, характеризующий отношение суммарной тяги двигателя к его мощности.

Из практики реализации ПВС и выбора винтомоторной группы известно, что достаточно хорошим значением коэффициента эффективности считается $k = 10$ кг/кВт и выше. Это означает, что на каждый киловатт затраченной энергии можно поднимать 10 кг нагрузки. Значение коэффициента эффективности в значительной мере зависит от типа двигателей и характеристик тяговых винтов. Для ПВС с увеличением высоты подъема увеличивается вес нагрузки (за счет увеличения силы натяжения кабель-троса), и соответственно эффективность винтомоторной группы снижается⁵.

Расчет силы натяжения ($F_{кт}$), действующей со стороны кабель-троса на ПВС, описан в [9] и представляет собой систему дифференциальных уравнений, одно из которых является линейным дифференциальным уравнением первого порядка, а два других – нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка. Следует отметить, что полученная система дифференциальных уравнений совпадает с уравнением положения гибкой нити [10] для привязного летательного объекта:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{dF_{кт}}{dz} - \rho_{кт}g = 0, \\ & F_{кт} \frac{d^2x}{dz^2} + \rho_{кт}g \frac{dx}{dz} \left(1 + \left(\frac{dx}{dz} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dz} \right)^2 \right) + \\ & + A \sqrt{v_x^2(z) + v_y^2(z) + \left(v_x(z) \frac{dy}{dz} - v_y(z) \frac{dx}{dz} \right)^2} \times \\ & \times v_x(z) \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dz} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dz} \right)^2} = 0, \\ & F_{кт} \frac{d^2y}{dz^2} + \rho_{кт}g \frac{dy}{dz} \left(1 + \left(\frac{dx}{dz} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dz} \right)^2 \right) + \\ & + A \sqrt{v_x^2(z) + v_y^2(z) + \left(v_x(z) \frac{dy}{dz} - v_y(z) \frac{dx}{dz} \right)^2} \times \\ & \times v_y(z) \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dz} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dz} \right)^2} = 0, \end{aligned} \right. \quad (17)$$

⁵ XRotor 8 Series Power Combo for Agricultral Drones. <https://www.hobbywing.com/en/products/xrotor-6-series-power-combo-for-agricultral-drones226.html>. Дата обращения 11.05.2023. / Accessed May 11, 2023.

где A – коэффициент аэродинамического сопротивления; $\rho_{кт}$ – линейная плотность кабель-троса; x, y, z – прямоугольная система координат; v_x, v_y, v_z – проекции скорости ветра на соответствующие оси прямоугольной системы координат.

Сложность рассматриваемой задачи заключается в том, что при ее решении необходимо решать не задачу Коши, а краевую задачу, когда условия задаются при различных значениях аргумента z [11].

С учетом (10), (11), (16), (17), необходимая мощность для функционирования ПВС определяется следующим образом:

$$P = \frac{\sqrt{(m_{БПЛА}g + m_{пн}g + |\mathbf{F}_{кт}| \sin \alpha)^2 + (|\mathbf{F}_{св}| + |\mathbf{F}_{кт}| \cos \alpha)^2}}{k \times g}. \quad (18)$$

В диссертации А.М. Ширванян⁶ представлен расчет необходимой мощности для функционирования ПВС массой 25 кг и 35 кг на высоте 75 м при действии силы натяжения $F_{кт} = 10$ Н и 30 Н (рис. 7). Исходя из этого, можно заключить, что существенное влияние на необходимую мощность оказывает высокая скорость ветра и движение корабля. При увеличении скорости ветра (и/или движения корабля) увеличивается угол наклона α действия силы натяжения кабель-троса $F_{кт}$ на ПВС, что увеличивает горизонтальную составляющую силы натяжения. Кроме того, изменение силы натяжения кабель-троса лебедкой существенно меняет его профиль и длину.

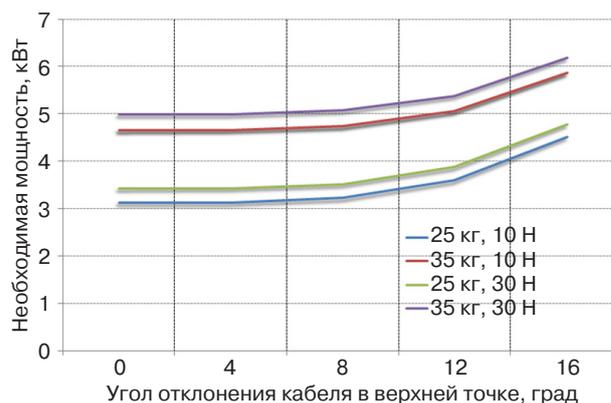


Рис. 7. Зависимость необходимой мощности ПВС от скорости ветра при разной массе и силе натяжения кабель-троса

⁶ Ширванян А.М. Разработка и исследование математической модели привязных высотных беспилотных телекоммуникационных платформ, функционирующих при ветровых нагрузках: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18. М., 2020. 116 с. [Shirvanyan A.M. Development and research for the mathematical model of the tethered high-altitude unmanned telecommunication platforms functioning at wind loads. Cand. Sci. Thesis (Eng.). Moscow, 2020, 116 p. (in Russ.).]

Для системы управления приводом лебедки кабель-троса важно найти баланс между силой натяжения кабель-троса лебедкой и затрачиваемой мощностью БПЛА. Слабое натяжение лебедки может спровоцировать большой выпуск кабель-троса, что небезопасно в корабельных условиях. Сильное натяжение лебедкой делает профиль кабеля практически вертикальным, но при этом существенно увеличивает необходимую для функционирования мощность БПЛА.

Полученные данные важны для оценки максимальной массы полезной нагрузки и необходимой передаваемой с корабля на БПЛА электрической энергии в условиях ветровых нагрузок и движения корабля, а также при проектировании системы управления позиционированием ПВС.

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ НА БПЛА

Для эффективной эксплуатации ПВС необходима подача энергии большой мощности. В настоящее время существуют эффективные системы электроснабжения БПЛА, выполненные на основе постоянного или переменного тока высокой частоты. Выбору рода тока питания подвесных систем посвящено большое количество материалов [12–15]. При питании переменным током можно получить относительно высокий КПД и меньшую площадь сечения проводников в сравнении с постоянным током. Однако в длинной линии питания неизбежно возникают волновые процессы, заключающиеся в возникновении отраженной волны, что приводит к повышению напряжения на некоторых участках

кабель-троса. В свернутом состоянии (на барабане лебедки) катушка с кабель-тросом представляет собой индуктивное сопротивление, что также препятствует передаче переменного тока. Вместе с этим, передача электроэнергии на промышленной частоте приводит к необходимости организации преобразования, что снижает массу полезной нагрузки.

При одинаковой мощности с увеличением напряжения питания уменьшается площадь сечения проводника, поэтому для питания БПЛА по кабель-тросу необходимо передавать высокое напряжение. Структура схемы питания представлена на рис. 8.

Максимальная передаваемая по кабель-тросу мощность будет зависеть от рода тока. Для расчета максимальной передаваемой мощности необходимо определить диаметр (площадь сечения) провода, плотность тока, межпроводное напряжение (для постоянного тока), волновое сопротивление (для переменного тока).

Мощность постоянного тока находится по формуле:

$$P_{\text{пост}} = IU = \pi \frac{d_M^2}{4} J U, \quad (19)$$

где I – сила тока, d_M – диаметр жилы медного провода, J – плотность тока, U – межпроводное напряжение.

Погонные потери в проводах определяются по формуле [16]:

$$\Delta_{\text{пост}} = 2S_M J^2 \sigma, \quad (20)$$

где σ – проводимость материала проводника.

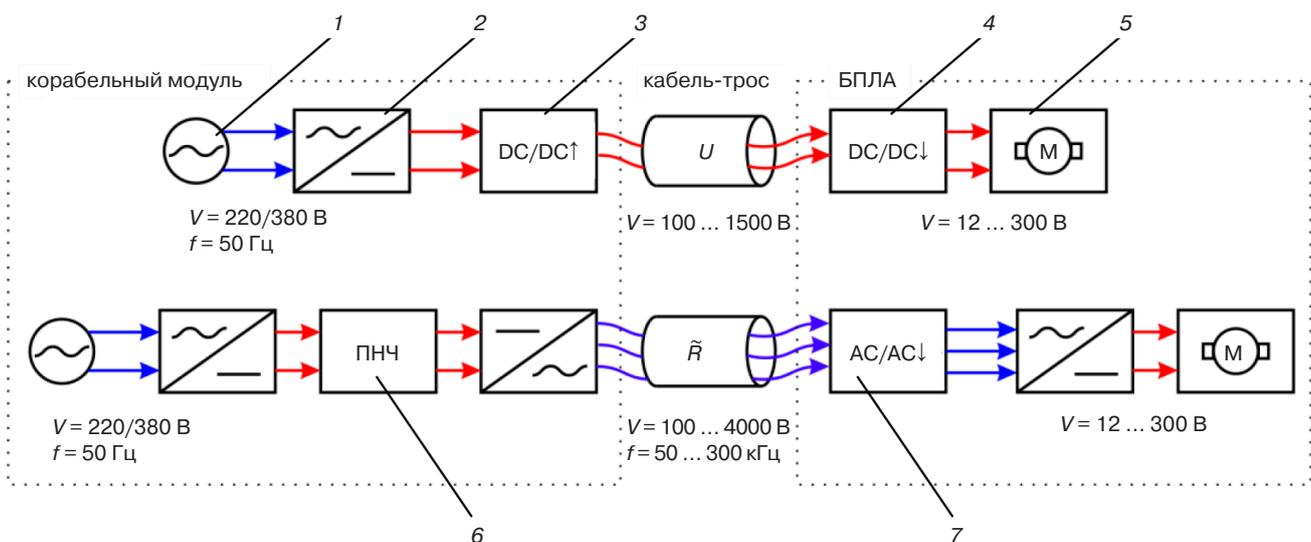


Рис. 8. Структура схемы питания ПВС: 1 – источник переменного напряжения, 2 – выпрямитель, 3 – повышающий преобразователь постоянного тока, 4 – DC-DC конвертер (преобразователь напряжения постоянного тока, direct current), 5 – потребитель БПЛА и полезной нагрузки (М – электрический мотор), 6 – преобразователь низкой частоты, 7 – понижающий преобразователь переменного тока (alternating current, AC). \tilde{R} – волновое сопротивление линии из двух проводников, V – напряжение, f – частота

При построении системы питания на переменном токе отраженные волны будут переносить энергию от точки соединения линии с нагрузкой обратно в источник энергии. Условием максимальной эффективности передачи энергии переменным током является равенство волнового сопротивления линии сопротивлению нагрузки линии. Максимальная передаваемая мощность определяется следующим образом:

$$P_{\text{пер}} = I^2 \tilde{R} = I^2 \frac{120}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{l_M}{r_M}, \quad (21)$$

где \tilde{R} – волновое сопротивление линии из двух проводников, l_M – расстояние между центрами двух проводников, ϵ – диэлектрическая проницаемость среды между проводниками.

Погонные потери мощности при переменном токе определяются по формуле:

$$\Delta_{\text{пер}} = 2S_M \sigma (K_s J)^2, \quad (22)$$

где K_s – коэффициент использования сечения.

Таким образом, при сравнении (20) и (22) видно, что погонные потери мощности при передаче переменным током меньше, чем при передаче постоянным током, вследствие влияния скин-эффекта. При использовании кабеля с $d_M > 6$ мм существенно возрастает максимально возможная мощность при переменном токе. Например, при $d_M = 8$ мм и напряжении 1200 В можно передать 48 кВт постоянного тока, в то же время при переменном токе – 135 кВт.

В [17] установлено, что незначительное увеличение радиуса токопроводящей жилы r_M дает большое увеличение передаваемой мощности, уменьшая долю затрат, необходимую для подъема и удержания кабель-троса. При меньшем радиусе токопроводящей жилы максимальная мощность несущественно зависит от рода тока. Таким образом, передача большой мощности (свыше 14 кВт) переменным током предпочтительней, а при меньших мощностях будет целесообразнее использование постоянного тока.

ВРЕМЯ РАЗВЕРТЫВАНИЯ И ПОДЪЕМ БПЛА НА УСТАНОВЛЕННУЮ ВЫСОТУ

Размещение ПВС в ТПК помимо очевидных плюсов имеет существенный недостаток. Транспортно-пусковой контейнер загружен в вертикальную пусковую установку, где находятся средства поражения различного типа и назначения. Эксплуатация развернутой ПВС частично или полностью блокирует использование данных средств, т.к. на пути их траектории может быть кабель-трос ПВС или БПЛА. Поэтому расчет времени развертывания (свертывания) имеет важное значение при эксплуатации ПВС на кораблях ВМФ. Время развертывания рассчитывается по следующей формуле:

$$t_p = t_{\text{пс}} + h / v_{\text{сп}}, \quad (23)$$

где $t_{\text{пс}}$ – время подъема (спуска) платформы с БПЛА в ТПК, $v_{\text{сп}}$ – скорость спуска (подъема) БПЛА.

При $t_{\text{пс}} = 5$ с, $v_{\text{сп}} = 4$ м/с время свертывания с высоты 100 м составит 30 с.

Для сравнения: привязной БПЛА ЕТОР (Israel Aerospace Industries, Израиль) с максимальной полезной нагрузкой 20 кг и высотой подъема 100 м имеет сопоставимое время развертывания [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация рассмотренных принципов построения ПВС позволит создать комплекс, способный с высокой эффективностью выполнять различные задачи. Разрабатываемая ПВС имеет значительные преимущества перед известными платформами: контейнерное хранение и запуск, система передачи энергии большой мощности по кабель-тросу малого сечения (малой погонной массы), стабилизация БПЛА с полезной нагрузкой по высоте. Вместе с этим перспективная ПВС обеспечивает подъем полезной нагрузки на высоту 100 м с длительным сроком функционирования, ограниченным лишь характеристиками надежности ПВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khofiyah N.A., Maret S., Sutopo W., Nugroho B.D.A. Goldsmith's Commercialization Model for Feasibility Study of Technology Lithium Battery Pack Drone. In: *2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*. IEEE; 2018. P. 147–151. <https://doi.org/10.1109/ICEVT.2018.8628439>
2. Zikou L., Papachristos C., Tzes A. The Power-over-Tether system for powering small UAVs: Tethering-line tension control synthesis. In: *Proceedings of the 2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. IEEE; 2015. P. 681–687. <https://doi.org/10.1109/MED.2015.7158825>
3. Соловьева В.В., Шаров С.Н. Судовые взлетные и посадочные устройства беспилотных летательных аппаратов. *Морской вестник*. 2015;1(53):65–69. URL: <https://www.elibrary.ru/tjxpif>

4. Вишнеvский В.М. Методы и алгоритмы проектирования и реализации привязных высотных беспилотных телекоммуникационных платформ. В сб.: *XIII Всероссийское совещание по проблемам управления: Сборник трудов. (VSPU – 2019)*. М.: Институт проблем управления; 2019. С. 40–42. URL: <https://vspu2019.ipu.ru/proceedings/0040.pdf>
5. Ботов М.И., Вяхирев В.А. *Основы теории радиолокационных систем и комплексов*. Красноярск: Сиб. федер. ун-т; 2013. 530 с. URL: https://vii.sfu-kras.ru/images/libs/Osnovi_teorii.pdf
6. Вишнеvский В.М., Ширванян А.М., Бряшко Н.Н. Расчет необходимой мощности для функционирования привязной беспилотной платформы в условиях турбулентной атмосферы. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2020;3:71–84. <https://doi.org/10.14357/20718632200307>
7. Лопухов А.А., Осипов Ю.Н., Ершов В.И., Симанов С.Е. Особенности формирования полезной нагрузки и технического облика беспилотной авиационной системы ретрансляции сигналов управления для наземных робототехнических комплексов. *Актуальные вопросы пожарной безопасности*. 2022;2(12):33–40. <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2022.40.70.004>
8. Wang G., Samarathunga W., Wang S. Uninterruptible Power Supply Design for Heavy Payload Tethered Hexarotors. *Int. J. Emerging Eng. Res. Technol.* 2016;4(2):16–21.
9. Вишнеvский В.М., Ширванян А.М., Тумченко Д.А. Математическая модель динамики функционирования привязной высотной телекоммуникационной платформы в условиях турбулентной атмосферы. В сб.: *Распределительные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь. Материалы 21 Международной научной конференции DCCN-2018*. М.: РУДН; 2018. С. 402–414.
10. Меркин Д.Р. *Введение в механику гибкой нити*. М.: Наука; 1980. 240 с.
11. Tognon M., Franchi A. Theory and Applications for Control of Aerial Robots in Physical Interaction Through Tethers. Part of the book series: *Springer Tracts in Advanced Robotics*. (STAR, vol. 140). Cham, Switzerland: Springer; 2021. 156 p.
12. Вишнеvский В.М., Тумченко Д.А., Ширванян А.М. Оптимальная структура высоковольтного кабеля для передачи энергии с земли на борт привязной высотной беспилотной телекоммуникационной платформы. В сб.: *Распределительные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь. Материалы 20 Международной научной конференции DCCN-2017*. М.: Техносфера; 2017. С. 197–205.
13. Герасимов В.А., Комлев А.В., Найденко Н.А., Филоженко А.Ю. Исследование и разработка системы энергообеспечения привязного подводного робота с модернизированным источником электропитания. *Подводные исследования и робототехника*. 2021;3(37):82–89. https://doi.org/10.37102/1992-4429_2021_37_03_08
14. Масюков М.В., Лукашов П.П. *Привязная мониторинговая платформа с системой питания*: пат. № 2724509 РФ. Заявка № 2019106709; заявл. 11.03.2019; опубл. 23.06.2020.
15. Ахобадзе Г.Н. *Система электроснабжения привязного летательного аппарата*: пат. № 2782805 РФ. Заявка № 2022116012; заявл. 14.06.2022; опубл. 02.11.2022.
16. Вишнеvский В.М., Терещенко Б.Н., Тумченко Д.А., Ширванян А.М. Сравнительный анализ вариантов построения проводной системы передачи энергии земля–борт для привязных высотных телекоммуникационных платформ. В сб.: *Распределительные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь. Материалы 21 Международной научной конференции DCCN-2018*. М.: РУДН; 2018. С. 387–401.
17. Нгуен Т.Л., Кузин Н.А., Юрков Н.К. К проблеме формирования облика перспективных беспилотных летательных аппаратов. *Надежность и качество сложных систем*. 2022;1(37):55–66. <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2022-1-7>

REFERENCES

1. Khofiyah N.A., Maret S., Sutopo W., Nugroho B.D.A. Goldsmith’s Commercialization Model for Feasibility Study of Technology Lithium Battery Pack Drone. In: *2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*. IEEE; 2018. P. 147–151. <https://doi.org/10.1109/ICEVT.2018.8628439>
2. Zikou L., Papachristos C., Tzes A. The Power-over-Tether system for powering small UAVs: Tethering-line tension control synthesis. In: *Proceedings of the 2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. IEEE; 2015. P. 681–687. <https://doi.org/10.1109/MED.2015.7158825>
3. Solovyeva V.V., Sharov S.N. Shipping take-off and alighting gears of unmanned flying vehicles. *Morskoy Vestnik*. 2015;1(53):65–69 (in Russ.). Available from URL: <https://www.elibrary.ru/tjxpif>
4. Vishnevskii V.M. Methods and algorithms for designing tethered high-altitude unmanned telecommunication platforms. In: *The 13th All-Russian Conference on Management Problems: Collection of Proceedings. (VSPU 2019)*. Moscow: Institute of Control Science RAS; 2019. P. 40–42 (in Russ.). Available from URL: <https://vspu2019.ipu.ru/proceedings/0040.pdf>
5. Botov M.I., Vyakhirev V.A. *Osnovy teorii radiolokatsionnykh sistem i kompleksov (Fundamentals of the Theory of Radar Systems and Complexes)*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2013. 530 p. (in Russ.). Available from URL: https://vii.sfu-kras.ru/images/libs/Osnovi_teorii.pdf
6. Vishnevsky V.M., Shirvanyan A.M., Bryashko N.N. Calculation of the required power for the operation of a tethered unmanned platform in a turbulent atmosphere. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy = Journal of Information Technologies and Computing Systems*. 2020;3:71–84 (in Russ.). <https://doi.org/10.14357/20718632200307>
7. Lopukhov A.A., Osipov YU.N., Ershov V.I., Simanov S.E. Formation features of effective load and technical characteristics of unmanned aircraft system of signal retranslation for ground-robotic systems control. *Aktual'nye voprosy pozharnoi bezopasnosti = Current Fire Safety Issues*. 2022;2(12):33–40 (in Russ.). <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2022.40.70.004>

8. Wang G., Samarathunga W., Wang S. Uninterruptible Power Supply Design for Heavy Payload Tethered Hexarotors. *Int. J. Emerging Eng. Res. Technol.* 2016;4(2):16–21.
9. Vishnevsky V.M., Shirvanyan A.M., Tumchenok D.A. Mathematical model of the dynamics of functioning of a tethered high-altitude telecommunications platform in a turbulent atmosphere. In: *Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications. Proceedings of the 21st International Scientific Conference DCCN 2018*. Moscow: RUDN University; 2018. P. 402–414 (in Russ.).
10. Merkin D.R. *Vvedenie v mekhaniku gibkoi niti (Introduction to Flexible Filament Mechanics)*. Moscow: Nauka; 1980. 240 p. (in Russ.).
11. Tognon M., Franchi A. *Theory and Applications for Control of Aerial Robots in Physical Interaction Through Tethers*. Part of the book series: *Springer Tracts in Advanced Robotics*. (STAR, vol. 140). Cham, Switzerland: Springer; 2021. 156 p.
12. Vishnevsky V.M., Tumchenok D.A., Shirvanyan A.M.M. Optimal structure of a high-voltage cable for transmitting energy from the ground to a tethered high-altitude unmanned telecommunications platform. In: *Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications. Proceedings of the 20 International Scientific Conference DCCN 2017*. Moscow: Tekhnosfera; 2017. P. 197–205 (in Russ.).
13. Gerasimov V.A., Komlev A.V., Naidenko N.A., Filozhenko A.Yu. Research and development of an energy supply system for a tethered underwater robot with an upgraded power source. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika = Underwater Investigations and Robotics*. 2021;3(37):82–89 (in Russ.). https://doi.org/10.37102/1992-4429_2021_37_03_08
14. Masyukov M.V., Lukashov P.P. *Tethered Monitoring Platform with Power System*: RF Pat. 2724509. Publ. 2020.06.23 (in Russ.).
15. Akhobadze G.N. *Electrical Supply System for Tethered Aircraft*: RF Pat. 2782805. Publ. 2022.11.02 (in Russ.).
16. Vishnevsky V.M., Tereshchenko B.N., Tumchenok D.A., Shirvanyan A.M. Comparative analysis of options for constructing a wired ground-to-air power transmission system for tethered high-altitude telecommunication platforms. In: *Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications. Proceedings of the 21st International Scientific Conference DCCN 2018*. Moscow: RUDN University; 2018. P. 387–401 (in Russ.).
17. Nguen T.L., Kuzin N.A., Yurkov N.K. On the problem of forming the appearance of promising unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2022;1(37):55–66 (in Russ.). <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2022-1-7>

Об авторе

Давлюд Игорь Игоревич, к.т.н., докторант, кафедра артиллерийского и зенитного ракетного вооружения надводных кораблей, Балтийское высшее военно-морское училище имени адмирала Ф.Ф. Ушакова (236022, Калининград, Советский пр-т, 82). E-mail: sawefew2@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0003-2926-718X>

About the author

Igor I. Dawlyud, Cand. Sci. (Eng.), Doctoral Student, Department of Artillery and Anti-Aircraft Missile Armament of Surface Ships, Admiral F.F. Ushakov Baltic Higher Naval School (82, Sovetsky pr., Kaliningrad, 236022 Russia). E-mail: sawefew2@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0003-2926-718X>

Роботизированные комплексы и системы.
Технологии дистанционного зондирования неразрушающего контроля
Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing

УДК 620.179.15
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-51-58>
EDN VOQEBL



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Решение томографической задачи с использованием дихотомической схемы дискретизации в полярных координатах и парциальных системных матриц, инвариантных к вращениям

А.А. Манушкин ^{1, @},
Н.Н. Потрахов ²,
А.В. Степанов ¹,
Е.Ю. Усачев ¹

¹ Диагностика-М, Москва, 109316 Россия

² СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 197022 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: manushkinaa@mail.ru

Резюме

Цели. Цель работы состояла в создании эффективного итерационного алгоритма для томографической реконструкции объектов с большими объемами исходных данных. В отличие от сверточного алгоритма проецирования, широко используемого в коммерческих промышленных и медицинских томографах, алгебраические итерационные методы реконструкции используют значительные объемы памяти и характеризуются большими временными затратами на реконструкцию. В то же время итерационные методы позволяют решать более широкий круг диагностических задач, где требуется большая точность реконструкции, а также в случаях использования ограниченного объема данных при малоракурсной съемке или съемке с ограниченным угловым диапазоном.

Методы. Особенностью созданного алгоритма является использование полярной системы координат, в которой проекционные системные матрицы инвариантны по отношению к вращению объекта. Это дает возможность значительно сократить объемы памяти для хранения проекционных матриц и использовать для реконструкции графические процессоры. В отличие от простой полярной системы координат, используемой ранее, нами была использована система координат с дихотомическим делением поля реконструкции, что позволяет обеспечить инвариантность к вращениям и в тоже время достаточно равномерное распределение пространственного разрешения по полю реконструкции.

Результаты. Был разработан алгоритм реконструкции, основанный на использовании парциальных системных матриц, соответствующих дихотомическому делению поля изображения на парциальные кольцевые области реконструкции. С использованием цифровых фантомов Шеппа – Логана и Де Фриза были исследованы особенности работы предложенного алгоритма реконструкции и показана его применимость для решения томографических задач.

Выводы. Предложенный алгоритм дает возможность реализовать алгебраическую реконструкцию изображения с использованием стандартных библиотек для работы с разреженными матрицами на базе настольных компьютеров с графическими процессорами.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, компьютерная томография, итерационный алгоритм, системная матрица

• Поступила: 11.12.2023 • Доработана: 06.03.2024 • Принята к опубликованию: 22.05.2024

Для цитирования: Манушкин А.А., Потрахов Н.Н., Степанов А.В., Усачев Е.Ю. Решение томографической задачи с использованием дихотомической схемы дискретизации в полярных координатах и парциальных системных матриц, инвариантных к вращениям. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):51–58. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-51-58>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Tomographic task solution using a dichotomous discretization scheme in polar coordinates and partial system matrices invariant to rotations

Alexey A. Manushkin ^{1, @},
Nikolay N. Potrachov ²,
Alexander V. Stepanov ¹,
Evgeny Yu. Usachev ¹

¹ *Diagnostika-M, Moscow, 109316 Russia*

² *Saint Petersburg Electrotechnical University (ETU "LETI"), St. Petersburg, 197022 Russia*

@ *Corresponding author, e-mail: manushkinaa@mail.ru*

Abstract

Objectives. The purpose of this work was to create an effective iterative algorithm for the tomographic reconstruction of objects with large volumes of initial data. Unlike the convolutional projection algorithm, widely used in commercial industrial and medical tomographic devices, algebraic iterative reconstruction methods use significant amounts of memory and typically involve long reconstruction times. At the same time, iterative methods enable a wider range of diagnostic tasks to be resolved where greater accuracy of reconstruction is required, as well as in cases where a limited amount of data is used for sparse-view angle shooting or shooting with a limited angular range.

Methods. A feature of the algorithm thus created is the use of a polar coordinate system in which the projection system matrices are invariant with respect to the rotation of the object. This enables a significant reduction of the amount of memory required for system matrices storage and the use of graphics processors for reconstruction. Unlike the simple polar coordinate system used earlier, we used a coordinate system with a dichotomous division of the reconstruction field enabling us to ensure invariance to rotations and at the same time a fairly uniform distribution of spatial resolution over the reconstruction field.

Results. A reconstruction algorithm was developed on the basis of the use of partial system matrices corresponding to the dichotomous division of the image field into partial annular reconstruction regions. A 2D and 3D digital phantom was used to show the features of the proposed reconstruction algorithm and its applicability to solving tomographic problems.

Conclusions. The proposed algorithm allows algebraic image reconstruction to be implemented using standard libraries for working with sparse matrices based on desktop computers with graphics processors.

Keywords: nondestructive technics, X-ray computed tomography, iterative algorithm, system matrix

• Submitted: 11.12.2023 • Revised: 06.03.2024 • Accepted: 22.05.2024

For citation: Manushkin A.A., Potrachov N.N., Stepanov A.V., Usachev E.Yu. Tomographic task solution using a dichotomous discretization scheme in polar coordinates and partial system matrices invariant to rotations. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):51–58. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-51-58>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения томографических задач реконструкции объекта по проекционным данным существуют два подхода.

Первый подход основывается на применении аналитической формулы реконструкции в верном для 2D-случая или конусном пучке для 3D-геометрии [1–3], которая предполагает получение полного набора данных в угловом диапазоне сканирования больше 180° с малым угловым шагом сканирования. Второй подход предполагает использование матричной формулировки томографической задачи с использованием регуляризирующих функционалов и итерационных алгоритмов реконструкции.

Достоинством второго подхода является возможность использования неполного набора данных при решении задач томосинтеза с ограниченным угловым диапазоном [4, 5] или для решения задач малоракурсной томографии при ограниченном числе проекций [6–11].

Другим преимуществом алгебраической реконструкции является возможность уменьшения влияния металлических артефактов за счет возможности исключения некорректных томографических данных из реконструкции без необходимости поиска подходящей интерполяции для их замены [12].

В настоящее время для решения задач томографической реконструкции широко используют графические процессоры, ускоряющие вычисления в десятки раз.

В случае 3D-томографии использование системной матрицы для декартовой системы координат, которая содержит всю информацию о геометрии съемки, затруднено из-за того, что ее хранение в памяти графического процессора невозможно из-за огромного объема. Поэтому при итерационной реконструкции применяют многократную трассировку лучей в режиме онлайн с использованием специальных средств программирования параллельных вычислительных потоков графического процессора, как, например, это сделано в программном пакете *TIGRE* [13].

При использовании системной матрицы можно использовать оптимизированные библиотеки вычислений с разреженными матрицами на графическом процессоре, что значительно упрощает разработку программного обеспечения. Библиотеки алгебраических процедур для работы с матрицами и векторами составляют основу

разработки программных средств обработки изображений и задач искусственного интеллекта и постоянно обновляются для работы на различных стационарных и мобильных вычислительных платформах.

В целом ряде промышленных 3D-томографов используется круговая геометрия съемки, в которой объект, расположенный между источником рентгеновского излучения и матричным детектором высокого разрешения, вращается на предметном столике. Если использовать полярную систему координат с центром на оси вращения объекта, то легко увидеть, что при надлежащем выборе шага радиальных линий, соответствующего шагу углового вращения, геометрия съемки и соответствующая ей системная матрица становятся инвариантными по отношению к вращению с дискретным шагом. Это дает возможность использования одной системной матрицы, рассчитанной только для одного углового положения, вместо того чтобы рассчитывать ее заново для десятков или сотен разных угловых положений в случае использования декартовой системы координат. Таким образом, возникает возможность размещения системной матрицы в ограниченной памяти графического процессора и ускорения вычислений.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для вычисления системной матрицы в полярной системе координат использовался алгоритм Сиддона [14], в котором для каждого луча вычисляются длины отрезков его пересечения с координатными линиями. Недостатком обычной полярной системы координат является увеличение азимутального размера вокселя при удалении от центра вращения. Чтобы свести к минимуму этот нежелательный эффект, было использовано дихотомическое деление поля реконструкции изображения согласно рис. 1.

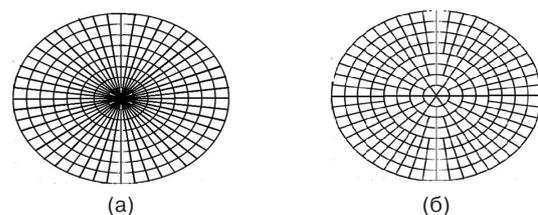


Рис. 1. Простая полярная (а) и дихотомическая (б) схемы дискретизации области реконструкции

В дихотомической схеме дискретизации изображения при каждом удвоении радиуса полярных линий происходит удвоение числа азимутальных линий. Таким образом, изображение объекта строится из последовательного ряда кольцевых сегментов с индексами $ind = 0, 1, 2, \dots, N$, внешний радиус R_{ind} которых задается формулой:

$$R_{ind} = 2^{ind}R_0,$$

где R_0 – радиус центрального сегмента с нулевым индексом.

В каждом кольцевом сегменте пиксели индексируются двумя индексами – полярным строковым индексом i :

$$i = 1, \dots, m,$$

$$m = 2^{ind} - 2^{(ind-1)},$$

и азимутальным столбцовым индексом j :

$$j = 1, \dots, n,$$

$$n = 6 \times 2^{ind}.$$

В соответствии с известным формализмом системной матрицы двумерная индексация заменяется одномерной с использованием столбцового индекса J , задаваемого формулой:

$$J = (j - 1)m + i.$$

Таким образом, в данной схеме дискретизации каждое изображение можно представить в виде совокупности концентрических кольцевых изображений, каждое из которых представляет из собой матрицу, векторизуемую вышеназванным способом. В итоге каждое изображение можно представить как вектор \mathbf{X} , составленный из векторов \mathbf{X}_{ind} , для каждого из которых существует своя парциальная матрица \mathbf{A}_{ind} прямого проецирования веерного пучка, осуществляемого по формуле:

$$\mathbf{V}_{ind} = \mathbf{A}_{ind}\mathbf{X}_{ind},$$

где \mathbf{V}_{ind} – парциальная проекция. Результирующая томографическая проекция \mathbf{V} представляет собой сумму проекций от всех кольцевых сегментов:

$$\mathbf{V} = \Sigma \mathbf{V}_{ind}.$$

В итоге проецирование изображения можно записать в стандартном виде произведения матрицы на вектор:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{X},$$

где результирующая матрица проецирования \mathbf{A} представляет собой горизонтальную конкатенацию матриц \mathbf{A}_{ind} :

$$\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \dots \mathbf{A}_N].$$

а вектор \mathbf{X} , соответственно, представляет собой вертикальную конкатенацию векторов \mathbf{X}_{ind} :

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \dots \\ \mathbf{X}_N \end{bmatrix}.$$

Чтобы учесть угловое сканирование, необходимо произвести вертикальное наращивание общей системной матрицы и, соответственно, наращивать парциальные матрицы в соответствии с числом выбранных ракурсов. При этом нет необходимости создавать новые парциальные матрицы, если при угловом повороте на дискретный угол $\Delta\theta$ радиальные линии соответствующего парциального кольцевого сегмента совпадают. Если угол чередования радиальных линий кольцевого сегмента совпадает с углом $\Delta\theta$ шага сканирования, то достаточно одной парциальной матрицы. Например, для сканирования с шагом 1° в интервале 360° при использовании декартовой дискретизации потребовалось бы по меньшей мере 90 разных парциальных матриц для каждого углового положения объекта. Таким образом, для полярной дискретизации объем памяти для хранения единственной системной матрицы сократится почти на 2 порядка. При переходе на предыдущие кольцевые сегменты меньшего радиуса число парциальных матриц растет дихотомически, однако легко увидеть, что при этом число столбцов этих матриц, соответствующее числу элементов кольцевого сегмента уменьшается пропорционально степени числа 4. Исходя из этого, можно сделать вывод, что при использовании дихотомической полярной дискретизации объекта требуемый объем памяти для хранения системной матрицы в сравнении с декартовой дискретизацией уменьшается пропорционально числу ракурсов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для численного эксперимента был выбран стандартный фантом Шеппа – Логана. Из-за особенностей дихотомического деления радиуса изображения размер фантома в декартовых пикселах был выбран равным 512×512 . Размер области реконструкции в пикселах примерно соответствует формату цифровых панельных детекторов с точки зрения соответствия их информационной емкости. С использованием данного фантома и равноуглового распределения

780 лучей в веерном пучке, были сгенерированы проекционные данные для $6 \times 2^7 = 768$ проекций при декартовом разбиении фантома на пиксели. Затем были сгенерированы парциальные системные матрицы для 8 сегментов, которые использовались для итерационной реконструкции объекта в полярной системе координат по классической формуле Ландвебера для градиентного спуска по квадратичному функционалу невязки [15]. Итерационная процедура была ускорена с использованием метода моментов.

На рис. 2 представлены реконструированные изображения цифрового фантома для разного числа итераций. Реконструкция в дихотомической системе дает приемлемое качество изображения, однако на восстановленном изображении видны кольцевые артефакты, вызванные тем, что при итерациях кольцевые области имеют разную скорость сходимости к своему пределу. Увеличение числа итераций с 50 до 500 сделало артефакты почти неразличимыми.

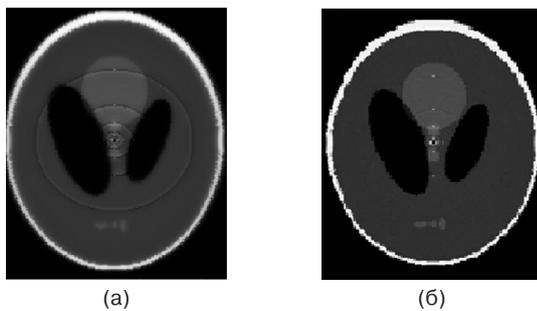


Рис. 2. Реконструкции фантома: (а) 50 итераций, (б) 500 итераций

Для проверки возможности применения дихотомической схемы для трехмерной томографической реконструкции с большим объемом данных был проведен численный эксперимент с использованием цифрового фантома Де Фриза, который используется при моделировании объемной реконструкции с широким коническим пучком. Моделирование проводилось в среде *MATLAB*¹ для круговой геометрии съемки с параметрами, указанными в таблице.

Результаты реконструкции цифрового фантома Де Фриза представлены на рис. 3.

Сравнение исходного и реконструированного фантомов показывает, что реконструкция алгебраическим методом, также как и алгоритм Фельдкамп, не восстанавливает полностью форму крайних дисков, по-видимому, из-за нарушения условия Кириллова – Туя, которое происходит при круговой геометрии съемки при широком конусном пучке [16].

Таблица. Параметры геометрии съемки для цифрового фантома

Расстояние от источника излучения до центра вращения, мм	300
Расстояние от центра вращения до детектора, мм	138
Размер поля регистрации на плоскостанельном детекторе, мм ²	600 × 220
Размер пикселей детектора, мм ²	1 × 1
Размер поля реконструкции, мм ³ (длина × ширина × высота)	256 × 256 × 128
Угловой диапазон вращения, °	0–359
Число шагов вращения	768
Размер фантома, мм ³ (длина × ширина × высота)	256 × 256 × 128

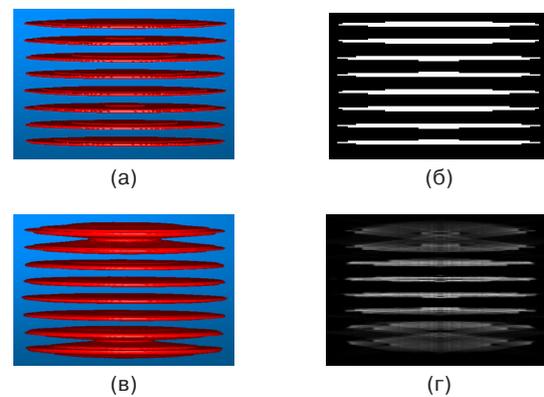


Рис. 3. Фантом Де Фриза: (а) объемное изображение, (б) сечение и результат его реконструкции (в) объемное изображение, (г) сечение

Для реконструкции изображения использовался ускоренный градиентный спуск по методу моментов Нестерова. Всего потребовалось 40 итераций и 440 секунд на их реализацию в среде *MATLAB* при использовании при использовании видеокарты GeForce RTX 2080 (производитель – NVIDIA, США). Анализ работы программы реконструкции показал, что большое время вычисления связано с особенностями работы интерпретатора среды *MATLAB*, который самостоятельно, независимо от пользователя, организует итерационный процесс, куда помимо вычислительных итерационных процедур могут входить системные процедуры *MATLAB*. В нашем случае операция проецирования вектора парциальной матрицей с максимальным индексом занимает 0.0004 секунд. При оптимальной организации вычислительного процесса на одну итерацию должно уходить не более 2 секунд. Для 40 итераций общее время реконструкции не должно превышать 2 минуты, что сопоставимо с временем реконструкции

¹ <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. Дата обращения 14.06.2024. / Accessed June 14, 2024.

данного цифрового фантома методом сопряженных градиентов при использовании пакета *TIGRE*.

При реализации предложенного алгоритма на более низком уровне на языке C++ с расширением CUDA допустимо применение 32 битного формата хранения данных вместо 64-битного представления допускаемого в *MATLAB* для разреженных матриц. Кроме того, топовые игровые видеокарты имеют 24 Гб выделенной графической памяти. Если принять во внимание, что алгебраическая реконструкция допускает использование меньшего объема данных для реконструкции, то можно сделать вывод о том, что предложенный алгоритм позволяет применять вычислительные возможности персонального компьютера для решения широкого круга томографических задач. На основе данного алгоритма целесообразно создание настольных вычислительных систем для обучения и моделирования работы компьютерных томографов с целью оптимизации их параметров [17, 18].

Таким образом, в работе предложена работоспособная схема дискретизации, совмещающая в себе достоинства полярной системы (инвариантность к вращениям) и декартовой системы (примерно одинаковую плотность пикселей). Применение полярной системы координат без дихотомического деления пикселей, использованное в работе [19], приведет к тому, что соответствие между числом пикселей кольцевых сегментов и числом пикселей соответствующих им сегментов детектора будет разным. Если для внешних сегментов это соответствие будет правильным, т.е. число соответствующих пикселей будет примерно одинаковым, то для внутренних областей информационная емкость соответствующей области детектора будет недостаточной. Это приведет к недоопределенности системы линейных уравнений, и соответственно к необходимости использования регуляризации с целью избежания появления различных артефактов, характерных для томографии с ограниченными данными. Наоборот, если для внутренних областей число соответствующих пикселей детектора будет достаточным, то для внешних областей число данных будет избыточным, и для внешних областей детектора необходимо использовать биннинг с целью экономии памяти и ускорения реконструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование дихотомической полярной схемы деления изображения на пиксели открывает возможности итерационной алгебраической реконструкции изображения с минимальными

затратами памяти при использовании настольного компьютера с современными видеокартами. Применительно к различным задачам рентгеновского неразрушающего контроля эти возможности будут исследованы в ходе численного моделирования на цифровых фантомах и экспериментальных исследований на настольном микротомографе с микрофокусным источником рентгеновского излучения и широкоформатным цифровым детектором².

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа проводится при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (по Соглашению с Минобрнауки России от 09 февраля 2023 г. № 075-11-2023-006, идентификатор государственного контракта – 000000S407523Q6V0002).

ACKNOWLEDGMENTS

The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Agreement with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation dated February 09, 2023, No. 075-11-2023-006, State Contract Identifier 000000S407523Q6V0002).

Вклад авторов

А.А. Манушкин – разработка идеи проекта, компьютерное моделирование, работа с графическим материалом, написание текста рукописи.

Н.Н. Потрахов – администрирование проекта, критический обзор, анализ и систематизация полученных результатов, проведение сравнительного анализа, обобщение результатов исследования, формулирование выводов.

А.В. Степанов – надзор, мониторинг исследовательской деятельности.

Е.Ю. Усачев – разработка и анализ идеи, привлечение финансирования.

Authors' contributions

A.A. Manushkin – conceptualization and research design, computer simulation, working with graphic material, and writing the text of the manuscript.

N.N. Potrachov – project administration, writing and editing original draft, critical review. Analysis and systematization of the results obtained. Conducting comparative analysis. Generalization of research results. Formulation of conclusions.

A.V. Stepanov – supervision, monitoring research activities.

E.Yu. Usachev – conceptualization, funding acquisition.

² <https://eltech-med.com/ru/service/tomogram> (in Russ.). Дата обращения 14.06.2024. / Accessed June 14, 2024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Feldkamp L.A., Davis L.C., Kress J.W. Practical cone-beam algorithm *J. Opt. Soc. Am. A*. 1984;1(6):612–619. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.1.000612>
2. Zou Y., Pan X. Image reconstruction on PI-lines by use of filtered backprojection in helical cone-beam CT. *Phys. Med. Biol.* 2004;49:2717–2731. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/49/12/017>
3. Parker D.L. Optimal short scan convolution reconstruction for fan-beam CT. *Med. Phys.* 1982;9(2):245–257. <https://doi.org/10.1118/1.595078>
4. Chen Z., Jin X., Li L., Wang G. A limited-angle CT reconstruction method based on anisotropic TV minimization. *Phys. Med. Biol.* 2013;58:2119–2141. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/58/7/2119>
5. Wang C., Tao M., Nagy J.G., Lou Y. Limited-angle CT reconstruction via the L_1/L_2 minimization. *SIAM Journal on Imaging Sciences*. 2021;14(2):749–777. <https://doi.org/10.1137/20M1341490>
6. Li M., Zhang C., Peng C., Guan Y., Xu P., Sun M., Zheng J. Smoothed l_0 norm regularization for sparse-view X-ray CT reconstruction. *BioMed Res. Int.* 2016;2016:Article ID 2180457. <https://doi.org/10.1155/2016/2180457>
7. Sun Y., Chen H., Tao J., Lei L. Computed tomography image reconstruction from few views via Log-norm total variation minimization. *Digital Signal Processing*. 2019;88:172–181. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2019.02.009>
8. Sun Y., Tao J. Few views image reconstruction using alternating direction method via l_0 -norm minimization. *Int. J. Syst. Technol.* 2014;24(3):215–223. <https://doi.org/10.1002/ima.22097>
9. Xu Z., Chang X., Xu F., Zhang H. $L_{1/2}$ regularization: A thresholding representation theory and a fast solver. *IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst.* 2012;23(7):1013–1027. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2012.2197412>
10. Wang C., Yan M., Rahimi Y., Lou Y. Accelerated schemes for L_1/L_2 minimization. *IEEE Trans. Signal Processing*. 2020;68:2660–2669. <https://doi.org/10.1109/TSP.2020.2985298>
11. Jumanazarov D., Koo J., Kehres, J., Poulsen H.F., Olsen U.L., Iovea M. Material classification from sparse spectral X-ray CT using vectorial total variation based on L infinity norm. *Mater. Charact.* 2022;187:111864. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.111864>
12. Hegazy M.A.A., Cho M.H., Cho M.H., Lee S.Y. Metal artifact reduction in dental CBCT Images using direct sinogram correction combined with metal path-length weighting. *Sensors*. 2023;23(3):1288. <https://doi.org/10.3390/s23031288>
13. Bigury A., Dosanjh M., Hancock S., Soleimani M. Tigre: A MATLAB-GPU toolbox for CBCT image reconstruction. *Biomed. Phys. Eng. Express*. 2016;2(5):055010. <http://doi.org/10.1088/2057-1976/2/5/055010>
14. Siddon R.L. Fast calculation of the exact radiological path for a three-dimensional CT array. *Med. Phys.* 1985;12(2):252–255. <https://doi.org/10.1118/1.595715>
15. Landweber L. An iteration formula for Fredholm integral equations of the first kind. *Am. J. Math.* 1951;73(3):615–624. <https://doi.org/10.2307/2372313>
16. Tuy H.K. An inversion formula for cone-beam reconstruction. *SIAM. J. Appl. Math.* 1983;43(3):546–552. <https://doi.org/10.1137/0143035>
17. Osipov S.P., Chakhlov S.V., Zhvyrbliya V.Y., Sednev D.A., Osipov O.S., Usachev E.Y. The Nature of Metal Artifacts in X-ray Computed Tomography and Their Reduction by Optimization of Tomography Systems Parameters. *Appl. Sci.* 2023;13(4):2666. <https://doi.org/10.3390/app13042666>
18. Hashem N., Pryor M., Haas D., Hunter J. Design of a Computed Tomography Automation Architecture. *Appl. Sci.* 2021;11(6):2858. <https://doi.org/10.3390/app11062858>
19. Jian L., Litao L., Peng C., Qi S., Zhifang W. Rotating polar-coordinate ART applied in industrial CT image reconstruction. *NDT&E International*. 2007;40(4):333–336. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2006.11.005>

Об авторах

Манушкин Алексей Анатольевич, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, ООО «Диагностика-М» (109316, Россия, Москва, Волгоградский просп., д. 42). E-mail: manushkinaa@mail.ru. Scopus Author ID 6507658966, <https://orcid.org/0009-0009-8428-9588>

Потрахов Николай Николаевич, д.т.н., заведующий кафедрой электронных приборов и устройств; главный научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») (197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, литера Ф). E-mail: npotrahov@epu.ru. Scopus Author ID 8689381700, SPIN-код РИНЦ 8875-7322, <https://orcid.org/0000-0001-8806-0603>

Степанов Александр Вячеславович, к.т.н., начальник отдела промышленной интроскопии и диагностики, ООО «Диагностика-М» (109316, Россия, Москва, Волгоградский просп., д. 42). E-mail: stepanov_a@x-ray.ru. SPIN-код РИНЦ 3806-5336, <https://orcid.org/0009-0000-0760-6222>

Усачев Евгений Юрьевич, к.т.н., учредитель ООО «Диагностика-М» (109316, Россия, Москва, Волгоградский просп., д. 42). E-mail: usachev_e@x-ray.ru. Scopus Author ID 55193172600, SPIN-код РИНЦ 6504-4959, <https://orcid.org/0000-0001-5197-2465>

About the authors

Alexey A. Manushkin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Diagnostika-M (42, Volgogradskii pr., Moscow, 109316 Россия). E-mail: manushkinaa@mail.ru. Scopus Author ID 6507658966, <https://orcid.org/0009-0009-8428-9588>

Nikolay N. Potrachov, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Electronic Instruments and Devices; Chief Researcher, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI (5, ul. Professora Popova, St. Petersburg, 197022 Russia). E-mail: nnpotrachov@epu.ru. Scopus Author ID 8689381700, SPIN-код РИНЦ 8875-7322, <https://orcid.org/0000-0001-8806-0603>

Alexander V. Stepanov, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Industrial Introscopy and Diagnostics, Diagnostika-M (42, Volgogradskii pr., Moscow, 109316 Russia). E-mail: stepanov_a@x-ray.ru. RSCI SPIN-code 3806-5336, <https://orcid.org/0009-0000-0760-6222>

Evgeny Yu. Usachev, Cand. Sci. (Eng.), Founder, Diagnostika-M (42, Volgogradskii pr., Moscow, 109316 Russia). E-mail: usachev_e@x-ray.ru. Scopus Author ID 55193172600, RSCI SPIN-code 6504-4959, <https://orcid.org/0000-0001-5197-2465>

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 537.874:537.877:621.37
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-59-69>
EDN PYJISU



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Цифровые технологии сигнального радиовидения и радиомониторинга

М.С. Костин[@],
К.А. Бойков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[@] Автор для переписки, e-mail: kostin_m@mirea.ru

Резюме

Цели. Цель работы – разработка методов и алгоритмов векторного анализа радиоволновой деформации нестационарных полей, образующих сигнальное радиоизображение, определяемое радиофизическими и топологическими признаками малоразмерных объектов; создание программно-аппаратных средств регистрации и нейросетевого распознавания сигнальных радиоизображений, в т.ч. методов синтеза и экстракции сигнальных радиогеномов при помощи цифровых двойников объектов, полученных посредством векторного электродинамического моделирования; анализ сигнальных радиоизображений, наводимых элементами печатной топологии электронных устройств.

Методы. Используются методы статистической радиофизики, частотно-временные методы вейвлет-преобразования финитных во времени сигнальных радиоизображений, численные методы электродинамики при создании цифровых двойников малоразмерных объектов, а также нейросетевые алгоритмы аутентификации, основанные на кумулянтной теории полюсно-генетических и резонансных физически неклонированных функций (ФНФ), используемых при распознавании сигнальных радиоизображений.

Результаты. Приведены научные результаты фундаментальных исследований электродинамических эффектов векторно-волновой деформации нестационарных полей субнаносекундной конфигурации, представляющие интерес при распознавании и аутентификации сигнальных радиоизображений. Предложены нейросетевые методы кумулянтного формирования радиогеномов сигнальных радиоизображений на базе полюсно-генетических и резонансных функций.

Выводы. Показано, что радиогеном – уникальный аутентификатор радиоизображения – формируется в базе ФНФ, определяемых структурой и набором радиофизических параметров объекта. Выявлены кумулянтные признаки распознавания сигнальных радиоизображений в базе полюсно-генетических и резонансных ФНФ малоразмерных объектов.

Ключевые слова: сигнальное радиовидение, радиогеном, радиоизображение, физически неклонированная функция, кумулянта, полюсно-генетические функции

• Поступила: 28.01.2024 • Доработана: 21.02.2024 • Принята к опубликованию: 19.05.2024

Для цитирования: Костин М.С., Бойков К.А. Цифровые технологии сигнального радиовидения и радиомониторинга. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):59–69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-59-69>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Digital technologies for signal radio vision and radio monitoring

Mihail S. Kostin[@],
Konstantin A. Boikov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
[@] Corresponding author, e-mail: kostin_m@mirea.ru

Abstract

Objectives. Radiophysical processes involving the electrodynamic formation of signal radio images diffusely scattered by the signature of small-sized objects or induced by the near field of radio devices are relevant for identifying radiogenomic (cumulant) features of objects in the microwave range in the development of neuroimaging ultra-short pulse (USP) signal radio vision systems, telemonitoring, and near-radio detection. The paper sets out to develop methods and algorithms for vector analysis of radio wave deformation of nonstationary fields forming a signal radio image based on radiophysical and topological characteristics of small-sized objects; to develop software and hardware for registration and neural network recognition of signal radio images, including methods for the synthesis and extraction of signal radiogenomes using digital twins of objects obtained through vector electrodynamic modeling; and to analyze signal radio images induced by elements of printed topology of electronic devices.

Methods. The study is based on statistical radiophysics methods, time-frequency approaches for wavelet transformation of USP radio images, numerical electrodynamic methods for creating digital twins of small-sized objects, as well as neural network authentication algorithms based on the cumulant theory of pole-genetic and resonant physically unclonable functions used in identifying signal radio images.

Results. The results of fundamental research on electrodynamic effects of vector-wave deformation of nonstationary fields of sub-nanosecond configuration are presented as a means of identifying and authenticating signal radio images. Neural network techniques for cumulant formation of radio genomes of signal radio images are proposed on the basis of pole-genetic and resonant functions.

Conclusions. A radiogenome, representing the unique authenticator of a radio image, is shown to be formed on the basis of physically unclonable functions determined by the structure and set of radiophysical parameters of the image. Cumulant features of signal radio images identified on the basis of pole-genetic and physically unclonable resonant functions of small-sized objects are revealed.

Keywords: signal radiovision, radiogenome, radio image, physically unclonable function, cumulant, pole-genetic functions

• Submitted: 28.01.2024 • Revised: 21.02.2024 • Accepted: 19.05.2024

For citation: Kostin M.S., Boikov K.A. Digital technologies for signal radio vision and radio monitoring. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):59–69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-59-69>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Сигнальное радиовидение – область радиофизики, изучающая методы формирования, обработки и аутентификации векторных радиоизображений объектов в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне, полученных в результате диффузного рассеяния сигнатурой объекта сверхкоротких импульсов (СКИ), либо СКИ, наводимых электронными устройствами при переходных процессах на их компонентах и распределенных реактивностях топологии [1, 2]. Технология сигнального радиовидения основана на электродинамическом эффекте векторно-волновой деформации нестационарных полей субнаносекундной конфигурации, что для задач сверхширокополосного радиомониторинга позволяет получить не только векторное радиоизображение – сигнальный радиопрофиль (СРП), но и информацию о радиофизических параметрах облучаемого объекта, в т.ч. синтезировать спектрально-временной радиогеном или же уникальный аутентификатор в базе физически неклонированных функций (ФНФ) [1–9]. Действительно, радиометрические аутентификаторы объектов, в т.ч. радиоэлектронных устройств, определяемые параметрическим распределением характеристик реперных элементов и неоднородностей, составляющих их структуру (сигнатуру, топологию, архитектуру и т.д.), скрыты в волновых деформациях (дисперсионной, диссипативной, поляризационной, частотно-временной, фазодинамической) электромагнитного поля рассеянного или индуцируемого в пространство СКИ [10–14]. В целях выявления радиогеномных признаков малоразмерных объектов в СВЧ-диапазоне предложен нейросетевой подход к аутентификации радиоизображений по кумулянтам в базе полносно-генетических и резонансных ФНФ, синтезируемых при помощи технологии цифровых двойников (численных методов электродинамического моделирования) [3, 10].

Ранее опубликованные результаты исследований в области сигнального радиовидения, в т.ч. приведенные в работах [1, 2, 12], позволили установить, что аутентификаторы различных объектов, определяемые реперным базисом ФНФ, скрыты в волновых деформациях поля СКИ. Поскольку волновые профили сигнальных радиоизображений несхожих объектов способны иметь квазиидентичные огибающие,

это накладывает ограничения на их распознавание по огибающим СКИ, что, собственно, определяет научно-практический интерес к практической реализации радиоволновых технологий субнаносекундного разрешения.

1. ФОРМИРОВАНИЕ И АУТЕНТИФИКАЦИЯ СИГНАЛЬНЫХ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ, ДИФFUЗНО РАССЕЯННЫХ СИГНАТУРОЙ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

Частотно-временная аутентификация сигнальных радиоизображений определяется исходя из априорных данных исследования электродинамических особенностей протекания радиоволновых процессов нестационарных полей, рассеянных на импедансных неоднородностях облучаемого объекта, и состоит в разработке адаптивных алгоритмов анализа СКИ, основанных на сингулярно-статистических методах нахождения реперных фреймов (радиогеномов) во временном профиле сигнального радиоизображения, формирующих наиболее полное представление о структуре объекта в СВЧ-диапазоне (рис. 1) [1, 2, 9].

Для нахождения и распознавания реперных фреймов в сигнальном радиоизображении по заданным импульсным характеристикам (ИХ), синтезированным экспериментально, либо при помощи технологии цифровых двойников, разработаны нейросетевые алгоритмы, основанные на кумулянтной теории полносно-генетических и резонансных функций [1, 2, 9]. В качестве нейросети распознавания сигнальных радиоизображений выбрана сеть со сверхточной архитектурой ConvNet, состоящая из трех слоев и построенная на базе вычислительного 16-ядерного USB-модуля Intel Neural Compute Stick 2 (Intel Corporation, США), использующая при обучении метод обратного распространения для минимизации вероятности ошибки распознавания сигнатуры малоразмерного объекта.

Анализ частотно-временного распределения диффузно рассеянного СКИ предполагает предварительное вейвлет-преобразование полного радиотклика, в сигнальном радиоизображении которого сосредоточен радиогеном сигнатуры эквивалентной неоднородности малоразмерного объекта, сформированной его мгновенной эффективной площадью рассеяния (ЭПР), влияющей на характер

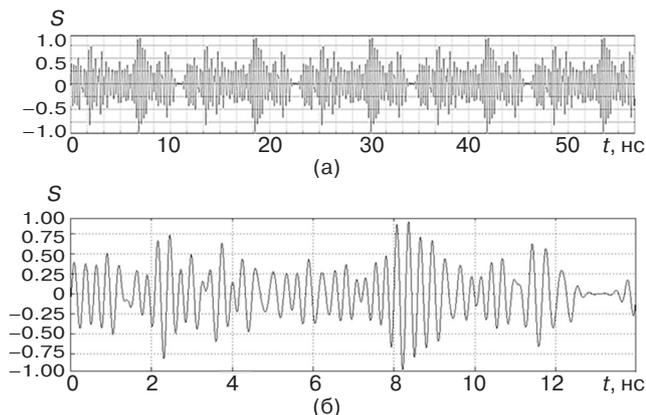


Рис. 1. Приведенное сигнальное радиоизображение малоразмерного объекта типа БПЛА: (а) периодичность СКИ на интервале эквивалентного времени; (б) реперный фрейм сигнального радиоизображения. S – приведенная шкала к максимуму величины мощности СКИ (безразмерная); t – эквивалентное время стробоскопического преобразования

суперпозиции спектральных формант, образованной в результате электродинамического процесса волновых деформаций E, H -компонент нестационарного поля [1–10]. При этом декомпозиция сигнального радиоотклика объекта в согласованном режиме может быть также достигнута при дискретном формировании функции спектральной плотности мощности СКИ во времени [10]. Это представляет уникальную возможность создания библиотеки сигнальных радиогеномов малоразмерных объектов типа «беспилотный летательный аппарат» (БПЛА) по заданным сигнатурам для формирования априорной информации о СКИ-радиоизображениях [1, 2, 10]. Действительно, при диффузном рассеянии СКИ малоразмерным объектом с динамической ЭПР вейвлет-преобразование в установленный момент времени по заданной оконной фрейм-функции позволяет локализовать и даже идентифицировать радиофизический характер проявления волновых деформаций СКИ $s(t)$ при его взаимодействии с сигнатурой. Так, установлено, что функциональный характер изменения СКИ-сигналов $y(t)$ полностью определяется свойствами ИХ $h(t)$ среды распространения и семейством локальных ИХ объекта как

$$y(t) = H[s(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)h(t - \tau)d\tau,$$

где H – оператор волновой деформации СКИ, определяемый радиофизическими и топологическими свойствами сигнатуры объекта. При этом сингулярно-статистическая оценка воспроизводимости радиоизображений показывает, что формирование интерференционных помех, обусловленных многолучевыми копиями $y(t)$, оказывает существенное

влияние на однозначность распознавания полюсно-генетических функций радиогенома [3]. В то же время вейвлет-кепстральная постобработка вида:

$$C(q) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_{гр}}^{+\omega_{гр}} \ln[S(\omega)]^2 e^{j\omega q_t} d\omega,$$

где $S(\omega)$ – амплитудный спектр СКИ $s(t)$; $\pm \omega_{гр}$ – граничные частоты интегрирования; $\ln[S(\omega)]^2$ – логоспектр; q_t – переменная кепстрального времени, позволяет компенсировать влияние райсовской (интерференционной) помехи, являясь наиболее эффективной при декомпозиции сигнальных радиоизображений по полюсно-генетическим функциям [1, 2].

Рассматривая случай, при котором радиоизображение объекта может быть представлено разницей его собственной ИХ одной и той же сигнатуры, сдвинутой на длительность СКИ, установлено, что радиогеном малоразмерного объекта определяется комплексным базисом собственных резонансных частот ω_m , $m = 1, 2, \dots, N$, а оценка ИХ малоразмерного объекта сводится к нахождению его полюсных функций

$$Q_m(\omega) = \frac{\dot{C}_m^*}{\omega + \dot{q}_m^*} - \frac{\dot{C}_m}{\omega - \dot{q}_m}, \quad \dot{q}_m = \omega_m + j\gamma_m,$$

сосредоточенных в частотно-временном отображении рассеянного СКИ-радиоотклика, полагая, что каждая из базисных функций $Q_m(\omega)$ с комплексной амплитудой \dot{C}_m^* содержит полюсную кумуляту \dot{q}_m с частотой ω_m и коэффициентом диссипации γ_m , задаваемым в качестве априорной информации при построении рекуррентной нейросети распознавания сигнальных радиоизображений.

На рис. 2 приведены векторные радиоизображения базисных сигнатур радиогеном малоразмерных объектов типа БПЛА и соответствующие им полюсные функции при отношении сигнал/шум 12 дБ, в т.ч. позволяющие определить функциональную связь смены сигнатуры объекта во времени с его радиогеномом [1, 2–8, 10].

Кроме того, ФНФ сигнатуры объекта (реперными идентификаторами) могут являться, собственно резонансные частоты (резонансные кумулянты), характеризующие набор реперных элементов и неоднородностей сигнатуры объекта, образующих суперпозицию резонаторов.

Характер распределения ФНФ формируется двумя компонентами: вынужденной, образуемой влиянием поляризации, скорости распределения напряженности поля, направлением и условиями среды распространения СКИ и т.д., и модовой, связанной

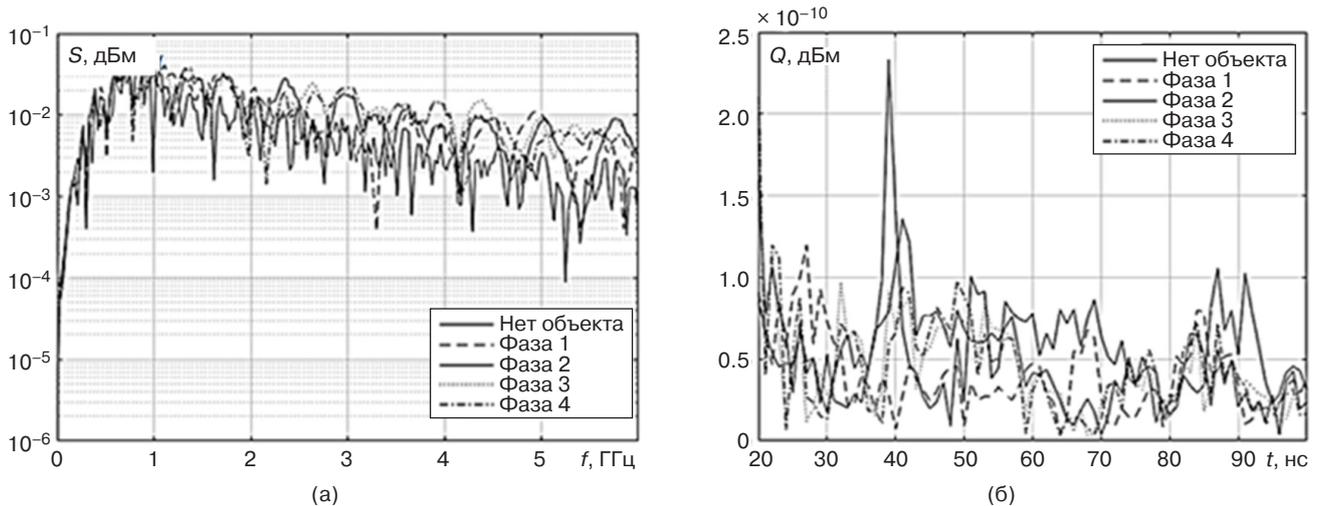


Рис. 2. Векторные радиоизображения БПЛА (а) и соответствующие им полюсные функции (б), полученные в периодичные фазы времени 10 нс. f – линейная частота ($\omega = 2\pi f$)

с диффузным рассеянием СКИ на резонансных и селективных структурах сигнатуры объекта. Так, для экстракции модовой составляющей на основе априорной информации о резонансных частотах, полученных, например, при облучении цифрового двойника (электродинамической модели) малоразмерного объекта, к радиоизображению подбирается дискриминационный (антирезонансный) сигнал $d_e(t)$ конечной длительности T_e , чтобы скомпенсировать резонансы в рассеянном СКИ $s(t)$, при котором свертка

$$\chi(t) = d_e s(t) = \int_0^{T_e} d_e(\tau) s(t - \tau) d\tau$$

для $t \geq T_e$ стремится к нулю.

На рис. 3 приведены кепстральные функции $C(q)$ резонансных кумулянт, модовой компоненты – радиогенома сигнального радиоизображения БПЛА [7, 10], векторное радиоизображение полюсных функций которого показано на рис. 2.

Исследования показывают, что при отношении сигнал/шум 12 дБ и дискриминационном перепаде 10 дБ между рассеянным СКИ и реперной ФНФ воспроизводимость распознавания радиоизображений по резонансным откликам достигает 0.95, т.е. сингуляризация радиоизображений малоразмерных объектов в заданном базисе резонансных частот (радиогеномных признаков), используемых в качестве кумулянт нейросети, не требует априорных сведений о полной спектрально-временной функции радиоизображения

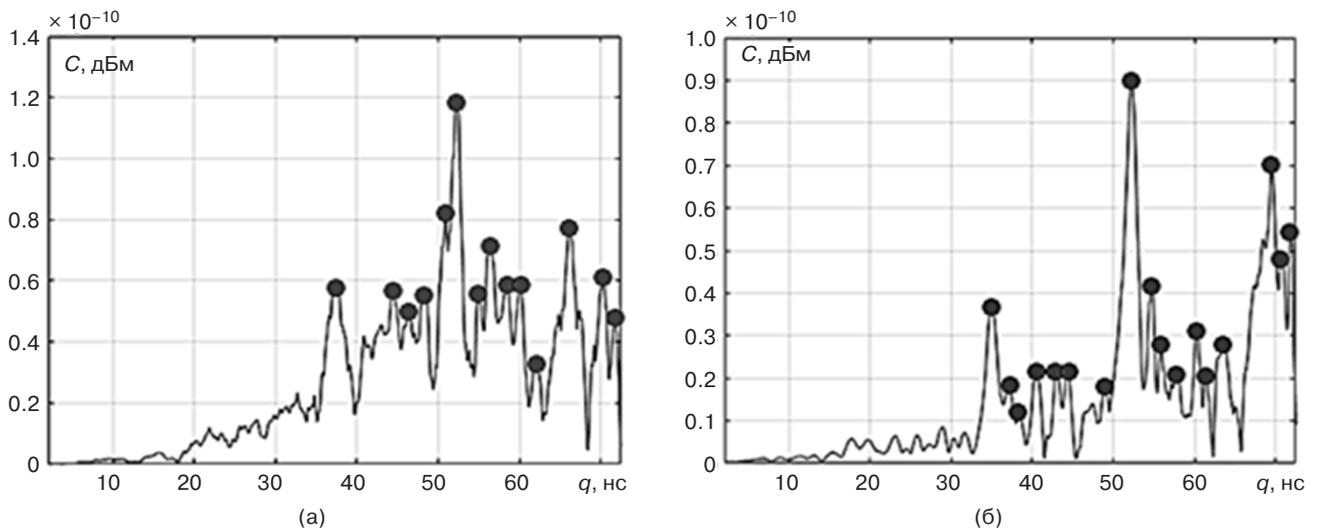


Рис. 3. Кепстральное представление резонансных составляющих сигнального радиоизображения БПЛА для двух ортогональных сигнатур малоразмерного объекта: (а) углометрическое положение при 0° , (б) углометрическое положение при 90°

объекта и позволяет повысить вероятность распознавания радиообразов объектов по реперным идентификаторам [9, 7, 10–12].

2. ФОРМИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ СИГНАЛЬНЫХ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ, НАВОДИМЫХ ЭЛЕМЕНТАМИ ПЕЧАТНОЙ ТОПОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Протекание сигнальных процессов на реактивных компонентах электронных устройств (ЭУ), как правило, сопровождается перераспределением энергии между емкостными и индуктивными элементами (далее – накопителями), которое для многопараметрической системы определяется стохастически осциллирующими наводимыми в пространство электромагнитными излучениями, образующими СРП или уникальное радиометрическое изображение ЭУ. При этом распределенные параметры электронной схемы – паразитные реактивности в проводящих линиях, в т.ч. элементах межслойной топологии, приводят к искажениям сигналов, связанным с крутизной фронтов сигнала и импедансными переотражениями [11]. Зачастую это ведет к понижению максимальной частоты функционирования цифровых устройств или вызывает снижение выходной мощности силовых выходов микросхем. При этом подводящая линия в топологии печатных модулей ЭУ накапливает электрическую и магнитную энергию, объединяя индуктивности, емкости и омические потери, значения которых зависят от топологии линии и свойств материала. При анализе формирования СРП в модуле ЭУ с излучающей схемотехнической архитектурой (топологией) необходимо проанализировать взаимосвязь между нагрузками потребителей и накопителями энергии. Эти взаимосвязи определяются значениями корней характеристического уравнения, которое составляется для излучающей схемотехнической архитектуры ЭУ.

При излучении во фрагментарной топологии ЭУ происходит перераспределение энергии между реактивными накопителями. Общее решение данного уравнения – свободная составляющая колебаний ($U_{св}$) с комплексно-сопряженными корнями $\dot{p}_{1,2} = -\delta \pm j\omega$. Узел ЭУ обычно состоит из группы компонентов, которые архитектурно формируют электрическую схему. Суммарное рабочее поле узла электронной схемы представляет собой суперпозицию излучений входных и выходных цепей, его составляющих. В моменты времени, соответствующие приходу возмущающего импульса (подача напряжения питания, переключение режимов функционирования, тактирование), эти составляющие излучают свободные затухающие колебания, описываемые выражением:

$$U(t) = \sum_{i=1}^N U_{сви}(t) = \sum_{i=1}^N U_{0i} e^{-\delta_i(t-t_{0i})} \sin[2\pi f_i(t-t_{0i})],$$

где N – количество составляющих, $U_{сви}$ – приведенное значение свободной составляющей i -го колебания, U_{0i} – приведенная амплитуда первой полуволны i -го колебания, δ_i – коэффициент затухания i -го колебания, t – текущий момент времени, t_{0i} – время излучения i -го колебания, f_i – частота i -го колебания. На рис. 4 показана декомпозиция СРП ЭУ с разложением на формантные составляющие.

Анализируя кривые, показанные на рис. 4б, можно видеть, что сигнальные параметры N -формантных составляющих СРП несут в себе информацию о электронном узле [12–15]. При исследовании значения N можно установить количество источников затухающих колебаний, что позволяет определить, участвуют ли все интересующие элементы узла в излучении. Если излучателей меньше, чем в эталонном СРП (принятом от функционирующего оригинального ЭУ), значит, обнаружена неисправность (либо

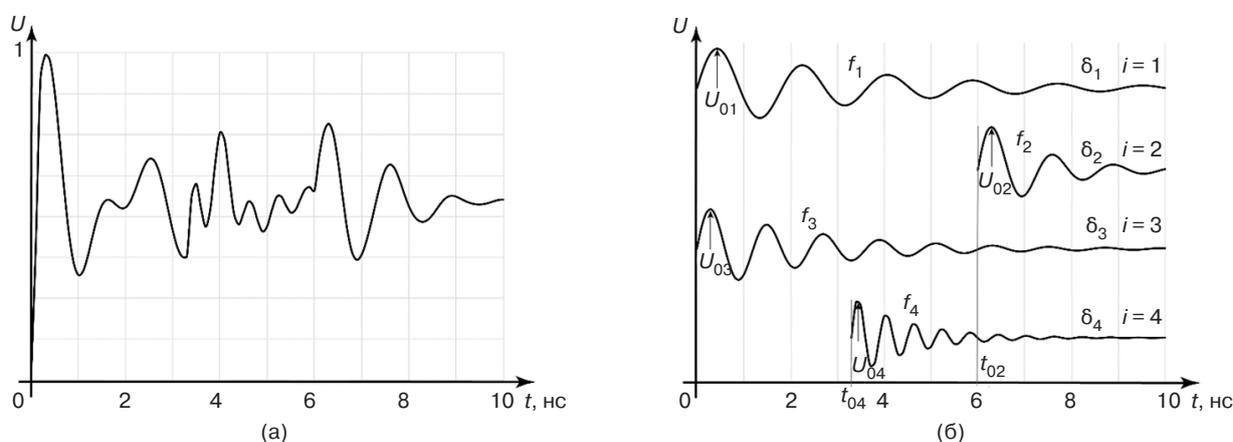


Рис. 4. Временное представление СРП:
(а) суперпозиция излучений, (б) составляющие СРП

неоригинальность) ЭУ, поскольку не все излучатели участвуют в формировании СРП. Превышение числа излучателей над эталонным значением говорит о некорректном измерении либо о появлении помехи при измерении. Амплитуда первой полуволны колебаний U_{0i} (рис. 4б) зависит от мощности излучения компонентов интересующего узла. Мощность данного излучения пропорциональна падению напряжения на излучателе и обратно пропорциональна удвоенному волновому сопротивлению излучателя Z [16]. Волновое сопротивление излучателя не зависит от электрических характеристик исследуемого радиоэлектронного узла, поэтому приведенная амплитуда первой полуволны колебания используется для оценки электрического потенциала на излучателе. Коэффициент затухания колебаний δ , который определяется индуктивностью и омическим сопротивлением, показывает скорость диссипации энергии. Паразитная и сосредоточенная индуктивности не имеют значительной зависимости от изменения внешних факторов, в то время как эквивалентное омическое сопротивление существенно зависит от температуры. Наибольшим изменениям подвержены удельные сопротивления подводящих проводников ρ и токопроводящих областей полупроводниковых приборов $\frac{d\rho}{dT} = \alpha_p \rho$, где α_p – температурный коэффициент удельного сопротивления проводника (для меди $\alpha_p = 4.1 \cdot 10^{-3}$ 1/К). Таким образом, коэффициент затухания, по существу, указывает на разницу температур между излучающим узлом и температурой, при которой проводилось эталонное измерение СРП.

При эквивалентных значениях емкостей порядка десятков пикофарад и эквивалентных омических сопротивлений примерно равных десятым долям 1 Ом частота колебаний f содержит информацию о качестве диэлектриков затвора структур металл–окисел–полупроводник или режимах работы p - n -переходов излучающих радиоэлектронных узлов ЭУ. Следует заметить, что частоты колебаний являются информативными при условии наличия эталонного сигнала с заранее извлеченными параметрами. При этом время начала излучения t_0 отражает скорость передачи возмущающего воздействия и характеризует быстродействие узла. Сравнивая измеренное значение этого параметра с эталонным значением, можно сделать вывод об изменении быстродействия компонентов исследуемого ЭУ.

Физически неклонированная функция, полученная путем регистрации электрической составляющей электромагнитного излучения электронных компонентов ЭУ, определяет физические параметры изделия с учетом разброса технологических допусков

по параметрам компонента. Реконструкция и анализ этой ФНФ путем кросс-корреляции с эталоном, принятым производителем ЭУ, а также сравнение параметров, полученных при разложении сложной ФНФ, позволяют дистанционно оценить оригинальность радиоэлектронного изделия [17].

Для регистрации СРП в лабораторных исследованиях используются чувствительные сверхширокополосные антенны, осциллографы с функцией памяти (или передачи данных), а также малошумящие предусилители мощности, обеспечивающие полосу пропускания в несколько гигагерц. Детальность исследования СРП и возможность оценки радиометрических характеристик устройства зависят от полосы пропускания и частоты дискретизации. Использование для приема и обработки СРП программно-определяемой радиосистемы за счет своей гибкости открывает новые возможности в области неразрушающего контроля и определения оригинальности ЭУ [18].

Суммарное рабочее поле в цифровых ЭУ излучается в момент подачи питающего напряжения при формировании сигналов управления внутренней и внешней периферией, сменах режима энергопотребления. В случае аналоговых схем СРП излучается лишь в момент подачи питающего напряжения.

При нахождении коэффициента затухания и фазы элементарного излучения используется оконное преобразование Фурье. Этот метод позволяет получить для каждой дискретной величины спектр затухающих колебаний с соответствующим смещением. Для визуализации данных в виде выборок строится трехмерная зависимость приведенного значения энергии сигнала X от частоты f и положения «окна» t (рис. 5).

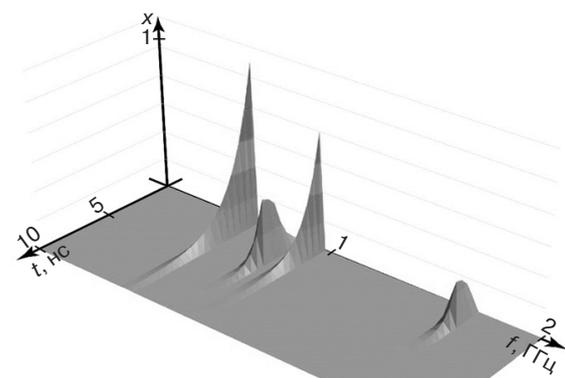
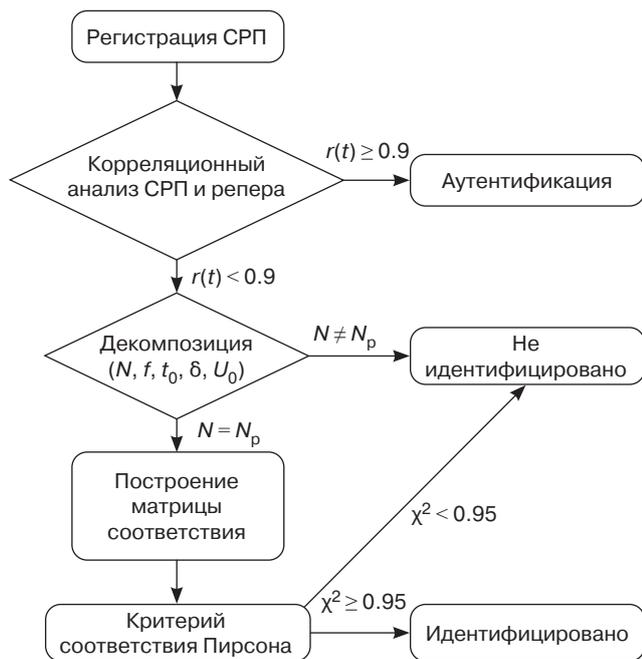


Рис. 5. Трехмерный спектр СРП

Если с увеличением времени значение амплитуды, приведенное к частоте, увеличивается или не изменяется, это указывает на отсутствие излучения при данном отсчете. Снижение амплитуды указывает на индуцирование излучения. Момент перехода от нарастания амплитуды к спаду (максимальная точка) является начальной точкой излучения. Затуханию



Излучатели Параметры	1	2	3	4
f	1	1	1	0
δ	1	0	1	1
t_0	1	1	1	1
U_0	1	1	0	1

Рис. 6. Архитектурная алгоритмика аутентификации ЭУ по СРП. N_p – число ожидаемых излучателей, $r(t)$ – корреляция между принятым СРП и репером

приведенного значения энергии будет соответствовать закон затухания колебаний с тем же коэффициентом $X_i = X_{0i} e^{-\delta_i t}$, где X_{0i} – амплитудный спектр i -го колебания в начальной точке. Корректное разложение СРП с экстракцией параметров возможно при отношении сигнал/шум более 18 дБ.

Для проведения аутентификации ЭУ строится матрица соответствия (рис. 6), где «1» означает попадание параметра излучателя в доверительный интервал, определяемый по результатам моделирования либо по экспериментальным данным.

Учитывая, что при аутентификации ЭУ ожидается попадание выборки параметров СРП в доверительный интервал (рис. 6), определяемый для каждого излучателя экспериментально, находится коэффициент согласия Пирсона

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(u_j - e_j)^2}{e_j},$$

где u_j – наблюдаемая частота признака в j -й группе, e_j – теоретическая частота признака в j -й группе. Проведенный анализ на основе экспериментальных данных показал, что для $\chi^2 \geq 0.95$ определяется достоверность аутентификации ЭУ не менее 95% [19, 20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уникальный аутентификатор радиоизображения – радиогеном, формируемый в базисе ФНФ, определяемых структурой и набором радиофизических параметров объекта, позволяет получить

информацию о радиофизических параметрах как облучаемого, так и излучающего СРП объекта. Радиометрические аутентификаторы объектов, в т.ч. ЭУ, определяемые параметрическим распределением характеристик реперных элементов и неоднородностей, составляющих их структуру (сигнатуру, топологию, архитектуру и т.д.), скрыты в волновых деформациях (дисперсионной, диссипативной, поляризационной, частотно-временной, фазодинамической) электромагнитного поля рассеянного или индуцируемого в пространство СКИ. Векторно-волновая деформация нестационарных полей субнаносекундной конфигурации позволяет распознавать и аутентифицировать объекты по сигнальным радиоизображениям – радиогеномам на базе синтезированных полюсно-генетических и резонансных ФНФ, используя нейросетевые алгоритмы. Экстракция параметров СРП с использованием плавающего «окна» открывает новые возможности в области идентификации радиофизических параметров ЭУ, в т.ч. при создании новых СВЧ-технологий сигнального радиовидения, телемониторинга и ближнего радиобнаружения. В качестве развития технологии сигнального радиовидения предполагается создание алгоритма распознавания радиоволновых изображений на основе метода векторного анализа, а также адаптация и эмуляция нейросети идентификации сигнальных радиоизображений со сверхточной архитектурой ConvNet на одноплатном модуле, формирование и экстракция базы данных радиогеномов малоразмерных объектов и ЭУ с целью создания прототипа автономного

нейровизионного программно-аппаратного комплекса ближнего радиообнаружения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Научная работа выполнена в рамках инициативной НИР «170-ИРИ» по тематике «СВЧ-технологии сигнального радиовидения, телемониторинга и ближнего радиообнаружения». Научно-практические результаты регистрации радиоизображений получены при помощи контрольно-измерительного оборудования компаний Rohde & Schwarz¹ в лаборатории «Радиоволновых процессов и модулей СВЧ» учебно-научного центра «TESLA» кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиоэлектроники и информатики РТУ МИРЭА.

ACKNOWLEDGMENTS

The study was carried out within the framework of the 170-IRI initiative research project on the topic “Microwave technologies for signal radio vision,

telemetry, and short-range radio detection.” Scientific and practical results of recording radio images were obtained using control and measuring equipment from Rohde & Schwarz in the laboratory of “Radio wave processes and microwave modules” of the TESLA educational and scientific center of the Department of Radio Wave Processes and Technologies of the Institute of Radio Electronics and Informatics of RTU MIREA.

Вклад авторов

М.С. Костин – постановка задачи, проведение эксперимента, анализ полученных результатов, формулировка выводов и написание статьи.

К.А. Бойков – проведение эксперимента, анализ полученных результатов, формулировка выводов и написание статьи.

Authors' contributions

M.S. Kostin – formulation of the problem, conducting the experiment, analyzing the results obtained, formulating conclusions, and writing the text of the article.

K.A. Boikov – conducting the experiment, analyzing the results, formulating conclusions, and writing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костин М.С., Бойков К.А. *Радиоволновые технологии субнаносекундного разрешения*: монография. М.: РТУ МИРЭА; 2021. 142 с. ISBN 978-5-7339-1565-4
2. Костин М.С., Бойков К.А. *Сигнально-архитектурный реинжиниринг и радиосенсорное распознавание электронных средств*: учебник. М.: Вологда: Инфра-Инженерия; 2024. 152 с. ISBN 978-5-9729-1832-4
3. Шадинов С.С. Пространственная сверхширокополосная визуализация зондируемых объектов ближнего радионаблюдения. *Журнал радиоэлектроники*. 2020;7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.7.8>. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul20/8/text.pdf>
4. Nerukh A., Benson T. *Non-stationary Electromagnetics*. USA: Jenny Stanford Publishing; 2012. 616 p. <https://doi.org/10.1201/b13058>
5. Allen B., Dohler M., Okon E.E., et al. *Ultra-Wideband Antennas and Propagation for Communications, Radar and Imaging*. USA: John Wiley & Sons; 2007. 475 p.
6. Mahafza B.R. *Radar Signal Analysis and Processing Using Matlab*. USA: CRC Press; 2016. 504 p.
7. Carrer L., Yarovoy A.G. Concealed weapon detection using UWB 3-D radar imaging and automatic target recognition. In: *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. 2014. P. 2786–2790. <https://doi.org/10.1109/EuCAP.2014.6902403>
8. Günther L. *Electromagnetic Field Theory for Engineers and Physicists*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2010. 659 p.
9. Oppermann I., Hämäläinen M., Iinatti J. *UWB: Theory and Applications*. John Wiley & Sons; 2004. 248 p.
10. Taylor J.D. (Ed.). *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets, and Advanced Ultrawideband Radar Systems*. Boca Raton, USA: CRC Press; 2016. 494 p.
11. Wang X., Dinh A., Teng D. Radar Sensing Using Ultra Wideband – Design and Implementation. In: Matin M.A. (Ed.). *Ultra Wideband – Current Status and Future Trends*. 2013;11:41–63. <https://dx.doi.org/10.5772/48587>
12. Шадинов С.С., Костин М.С., Коняшкин Г.В., Корчагин А.С., Романовский М.Ю., Гусейн-заде Н.Г. Векторный S-параметрический анализ сигнальных фазодинамических радиоизображений. *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки*. 2023;512(1):78–86. <https://doi.org/10.31857/S2686740023050115>
13. Бойков К.А. Определение параметров электронных устройств методом пассивной радиосенсорной технической диагностики. *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2021;24(6):63–70. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-6-63-70>
14. Лебедев Е.Ф., Осташев В.Е., Ульянов А.В. Устройства генерирования сверхширокополосных излучений радиочастотного диапазона с генераторами возбуждения полупроводникового типа. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»*. 2018;1(24):35–42.

¹ <https://www.rsh-tech.ru/> (in Russ.). Дата обращения 31.01.2024. / Accessed January 31, 2024.

15. Boikov K.A., Shamin A.E. Software Analysis of the Signal Radio Profile during Passive Radio-Sensor Technical Diagnostics. *J. Commun. Technol. Electron.* 2022;67(11):1337–1344. <https://doi.org/10.1134/S1064226922110018>
16. Астахов Н.В., Башкиров А.В., Журилова О.Е., Макаров О.Ю. Частотно-временной анализ нестационарных сигналов методами вейвлет-преобразования и оконного преобразования Фурье. *Радиотехника.* 2019;83(6–8):109–112.
17. Herder C., Ren L., van Dijk M., Yu M.-D., Devadas S. Trapdoor Computational Fuzzy Extractors and Cryptographically-Secure Physical Unclonable Functions. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing.* 2017;14(1):65–82. <https://doi.org/10.1109/TDSC.2016.2536609>
18. Лукьянчиков А.В., Лызлов А.В. Система мониторинга радио эфира с использованием технологии SDR. *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии.* 2021;3:69–70. URL: <https://elibrary.ru/dxiqdb>
19. Huang R., Cui H. Consistency of chi-squared test with varying number of classes. *J. Syst. Sci. Complex.* 2015;28(2):439–450. <https://doi.org/10.1007/s11424-015-3051-2>
20. Liu Y., Mu Y., Chen K., et al. Daily Activity Feature Selection in Smart Homes Based on Pearson Correlation Coefficient. *Neural Process. Lett.* 2020;51(2):1771–1787. <https://doi.org/10.1007/s11063-019-10185-8>

REFERENCES

1. Kostin M.S., Boikov K.A. *Radiovolnovye tekhnologii subnanosekundnogo razresheniya: monografiya (Radio Wave Technologies of Subnanosecond Resolution: monograph)*. Moscow: RTU MIREA; 2021. 142 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7339-1565-4
2. Kostin M.S., Boikov K.A. *Signal'no-arkhitekturnyi reinzhiniring i radiosensornoe raspoznavanie elektronnykh sredstv (Signal-Architectural Reengineering and Radiosensor Recognition of Electronic Devices: textbook)*. Moscow, Vologda: Infra-Inzheneriya; 2024. 152 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9729-1832-4
3. Shadinov S.S. Spatial ultra-wideband visualization of probed near-field surveillance objects. *Zhurnal Radioelektroniki = J. Radio Electronics.* 2020;7 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.7.8>. Available from URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul20/8/text.pdf>
4. Nerukh A., Benson T. *Non-stationary Electromagnetics*. USA: Jenny Stanford Publishing; 2012. 616 p. <https://doi.org/10.1201/b13058>
5. Allen B., Dohler M., Okon E.E., et al. *Ultra-Wideband Antennas and Propagation for Communications, Radar and Imaging*. USA: John Wiley & Sons; 2007. 475 p.
6. Mahafza B.R. *Radar Signal Analysis and Processing Using Matlab*. USA: CRC Press; 2016. 504 p.
7. Carrer L., Yarovoy A.G. Concealed weapon detection using UWB 3-D radar imaging and automatic target recognition. In: *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. 2014. P. 2786–2790. <https://doi.org/10.1109/EuCAP.2014.6902403>
8. Günther L. *Electromagnetic Field Theory for Engineers and Physicists*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2010. 659 p.
9. Oppermann I., Hämäläinen M., Inatti J. *UWB: Theory and Applications*. John Wiley & Sons; 2004. 248 p.
10. Taylor J.D. (Ed.). *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets, and Advanced Ultrawideband Radar Systems*. Boca Raton, USA: CRC Press; 2016. 494 p.
11. Wang X., Dinh A., Teng D. Radar Sensing Using Ultra Wideband – Design and Implementation. In: Matin M.A. (Ed.). *Ultra Wideband – Current Status and Future Trends*. 2013;11:41–63. <https://dx.doi.org/10.5772/48587>
12. Shadinov S.S., Kostin M.S., Konyashkin G.V., et al. Vector S-Parametric Analysis of Signal Phase Dynamic Radio Images. *Dokl. Phys.* 2023;68(9):311–318. <https://doi.org/10.1134/S1028335823090057>
[Original Russian Text: Shadinov S.S., Kostin M.S., Konyashkin G.V., Korchagin A.S., Romanovskii M.Yu., Gusein-zade N.G. Vector S-parametric analysis of signal phase dynamic radio images. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Fizika, tekhnicheskie nauki.* 2023;512(1):78–86 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2686740023050115>]
13. Boikov K.A. Determination of parameters of electronic devices by the method of passive radio-sensor technical diagnostics. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika = Journal of the Russian Universities. Radioelectronics.* 2021;24(6):63–70 (in Russ.). <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-6-63-70>
14. Lebedev E.F., Ostashev V.E., Ulyanov A.V. Means for generating ultra-wideband radio frequency emissions with semiconductor field generators. *Vestnik Kontserna VKO Almaz-Antei = Bulletin of Concern VKO Almaz-Antey.* 2018;1(24):35–42 (in Russ.).
15. Boikov K.A., Shamin A.E. Software Analysis of the Signal Radio Profile during Passive Radio-Sensor Technical Diagnostics. *J. Commun. Technol. Electron.* 2022;67(11):1337–1344. <https://doi.org/10.1134/S1064226922110018>
16. Astakhov N.V., Bashkirov A.V., Zhurilova O.E., Makarov O.Yu. Time-frequency analysis of non-stationary signals by wavelet transform and windowed Fourier transform. *Radiotekhnika = Radioengineering.* 2019;83(6–8):109–112 (in Russ.).
17. Herder C., Ren L., van Dijk M., Yu M.-D., Devadas S. Trapdoor Computational Fuzzy Extractors and Cryptographically-Secure Physical Unclonable Functions. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing.* 2017;14(1):65–82. <https://doi.org/10.1109/TDSC.2016.2536609>
18. Lukyanchikov A.V., Lyzlov A.V. Radio broadcast monitoring system using SDR technology. *SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii = Microwave and Telecommunication Technology.* 2021;3:69–70 (in Russ.). Available from URL: <https://elibrary.ru/dxiqdb>
19. Huang R., Cui H. Consistency of chi-squared test with varying number of classes. *J. Syst. Sci. Complex.* 2015;28(2):439–450. <https://doi.org/10.1007/s11424-015-3051-2>

20. Liu Y., Mu Y., Chen K., et al. Daily Activity Feature Selection in Smart Homes Based on Pearson Correlation Coefficient. *Neural Process. Lett.* 2020;51(2):1771–1787. <https://doi.org/10.1007/s11063-019-10185-8>

Об авторах

Костин Михаил Сергеевич, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой радиоволновых процессов и технологий, заместитель директора Института радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kostin_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671, SPIN-код РИНЦ 5819-2178, <http://orcid.org/0000-0002-5232-5478>

Бойков Константин Анатольевич, д.т.н., доцент, кафедра радиоволновых процессов и технологий, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bojkov_k@mirea.ru. Scopus Author ID 57208926258, SPIN-код РИНЦ 2014-6951, <http://orcid.org/0000-0003-0213-7337>

About the authors

Mihail S. Kostin, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Radio Wave Processes and Technologies, Deputy Director, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kostin_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671, RSCI SPIN-code 5819-2178, <http://orcid.org/0000-0002-5232-5478>

Konstantin A. Boikov, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bojkov_k@mirea.ru. Scopus Author ID 57208926258, RSCI SPIN-code 2014-6951, <http://orcid.org/0000-0003-0213-7337>

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.396.969
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-70-83>
EDN QDYIBS



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Принципы построения бортовых радиолокационных систем наноспутников, основанных на приеме отраженных сигналов спутниковых навигационных систем

А.В. Ксендзук^{1, @},
В.Ф. Фатеев²

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Солнечногорск, Московская область, 141570 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: ks_alex@mail.ru

Резюме

Цели. Создание радиолокационных систем дистанционного зондирования, основанных на приеме отраженных от поверхности Земли сигналов навигационных спутниковых систем, позволяет развернуть группировку наноспутников радиолокационного обзора земной поверхности. Целью работы является развитие принципов построения бортовых бистатических систем дистанционного зондирования на сверхмалых космических аппаратах, оценка энергетического потенциала и возможностей его увеличения.

Методы. Оптимальный метод обработки в бортовых бистатических радиолокационных системах (ББРЛС) является развитием известных аналитических методов оптимальной обработки в моностатических системах. Расчет энергетического потенциала основывается на исходных данных, полученных в ходе экспериментальных исследований других авторов.

Результаты. Использование сигналов навигационных спутниковых систем для зондирования поверхности является перспективным, развивающимся направлением. США и Китаем развернуты спутниковые группировки, осуществляющие дистанционное зондирование по отраженным сигналам навигационных спутников. Разработан алгоритм оптимальной обработки в таких системах, реализующий принцип синтеза апертуры, рассчитан энергетический потенциал бистатической радиолокационной системы с синтезом апертуры антенны. Для реализации обработки предложена схема с использованием стандартного навигационного приемника, который используется для формирования опорных сигналов.

Выводы. Применение методов оптимальной обработки в ББРЛС позволяет синтезировать радиолокационное изображение по сигналам космических навигационных аппаратов. Для повышения точности оценок необходимо увеличить отношение сигнал/шум за счет сочетания когерентного накопления (синтез апертуры) и некогерентного накопления (комплексирование измерений по разным космическим аппаратам). Предложенные в работе методы обработки сигналов и структура приемника на борту сверхмалого космического аппарата позволяют реализовать синтез апертуры при реализуемых требованиях к аппаратной части.

Ключевые слова: бистатическая радиолокационная система, синтез апертуры, навигационный спутник, оптимальная обработка

• Поступила: 29.11.2023 • Доработана: 02.02.2024 • Принята к опубликованию: 24.05.2024

Для цитирования: Ксендзук А.В., Фатеев В.Ф. Принципы построения бортовых радиолокационных систем наноспутников, основанных на приеме отраженных сигналов спутниковых навигационных систем. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):70–83. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-70-83>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Principles of construction of nanosatellite radar systems based on global navigation satellite system reflectometry

Alexander V. Ksendzuk ^{1, @},
Vyacheslav F. Fateev ²

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Scientific and Technical Center of Metrology in Gravimetry, VNIIFTRI, Solnechnogorsk, Moscow oblast, 141570 Russia

@ Corresponding author, e-mail: ks_alex@mail.ru

Abstract

Objectives. The development of radar remote sensing systems based on the reception of signals of navigation satellite systems reflected from the surface enables a constellation of nanosatellites to be deployed, in order to perform radar surveying of the Earth's surface. The aim of this work is to develop the principles of construction of onboard bistatic remote sensing systems on nanosatellites, in order to assess the energy potential and possibilities for its increase.

Methods. The optimal processing method in onboard bistatic radar systems is a development of known analytical methods of optimal processing in monostatic systems. The calculation of the energy potential is based on the experimental data obtained by other authors.

Results. The utilization of signals from navigation satellite systems for surface sensing is a promising and developing area. The USA and China have deployed satellite constellations to perform remote sensing using reflected signals of navigation satellites. An algorithm for optimal processing in such systems, which realizes the principle of aperture synthesis, was developed, and the energy potential of bistatic synthetic aperture radar was calculated. In order to achieve this processing, the proposed scheme uses a standard navigation receiver to form reference signals.

Conclusions. The application of optimal processing methods in bistatic radar enables a synthetic aperture based on scattered satellite navigation system signals. In order to improve the accuracy of estimates, the signal-to-noise ratio needs to be increased by combining coherent accumulation (aperture synthesis) and incoherent accumulation (aggregating measurements from different spacecraft). The signal processing methods and receiver structure proposed in this work onboard nanosatellites allow aperture synthesis to be achieved with realizable hardware requirements.

Keywords: bistatic radar, synthetic aperture, navigation satellite, optimal processing

• Submitted: 29.11.2023 • Revised: 02.02.2024 • Accepted: 24.05.2024

For citation: Ksendzук A.V., Fateev V.F. Principles of construction of nanosatellite radar systems based on global navigation satellite system reflectometry. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):70–83. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-70-83>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационные системы (РЛС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) космического базирования позволяют осуществлять мониторинг земной поверхности и расположенных на ней объектов независимо от погодных условий и времени суток.

Возможность съемки больших площадей, в т.ч. в труднодоступных районах, высокая оперативность, работа в любое время суток и при любой погоде привели к развертыванию спутниковых группировок (более 80 космических аппаратов (КА) на конец 2023 г.), решающих следующие задачи: построение радиолокационных изображений поверхности, обнаружение неподвижных и движущихся объектов, построение карт рельефа поверхности, оценка состояния водной поверхности (течения, приводный ветер, балльность волнения), мониторинг ураганов и цунами, контроль и прогнозирование ледовой обстановки, в т.ч. в арктической зоне и др. [1].

В настоящее время большинство космических радиолокационных средств ДЗЗ представляют собой моностатические радиолокаторы с синтезированием апертуры (РСА) антенны, бистатическая конфигурация была реализована только в виде TanDem-X (разработчик – EADS Astrium, Германия) [1].

В активных РСА возможности уменьшения размеров, массы и энергопотребления ограничиваются параметрами передатчика, который должен формировать достаточную для получения качественных изображений мощность. Так, например, для современной группировки из 27 КА РСА ICEYE (разработчик – ICEYE, Финляндия) пиковая излучаемая мощность составляет 3.2 кВт¹.

По этой причине отдельным направлением развития космических РЛС считаются неизлучающие системы. В таких системах роль передатчика выполняют существующие (сторонние) КА. Наиболее проработанным является вариант использования в качестве передатчиков глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), которые в иностранной литературе получил собственное название GNSS reflectometry (GNSS-R) [2, 3]. Этот вариант

реализации использовался в т.ч. для альтиметрии морской поверхности [4]. Российскими учеными также были предложены варианты создания средств ДЗЗ, основанных на использовании сигналов ГЛОНАСС² в части построения многопозиционных систем [5, 6], способов обработки сигналов в режиме синтезирования апертуры [7], использования наземной системы приема сигналов для определения параметров поверхности [8], использования летательных аппаратов для приема и обработки сигналов [9]. Однако практически был реализован только один проект [10].

Результаты обнаружения судов на фоне водной поверхности по сигналам ГНСС, приведенные в работах [10–12], показали возможность такого обнаружения только при реализации алгоритма синтезирования апертуры. В [13, 14] также опубликованы данные об успешном обнаружении речных судов по сигналам ГНСС при использовании синтезирования апертуры.

В 2014 г. был запущен спутник TechDemoSat-1 (SSTL, Великобритания), на котором размещалась аппаратура для приема отраженных от поверхности моря сигналов ГНСС и определения скорости ветра, а также границ между водной поверхностью и льдом.

Европейское космическое агентство 28 сентября 2015 г. запустило наноспутники Spire (Spire Global, Шотландия), которые по сигналам ГНСС формируют радиолокационные данные для водной, морской поверхности, ледового покрова, а также позволяют оценить параметры ионосферы [15].

Спутниковая группировка NASA Cyclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS), запущенная в декабре 2016 г., состоит из 8 спутников и обеспечивает разрешение в режиме когерентного накопления до 3.5×0.5 км с оценкой параметров водной поверхности и суши³.

Также были запущены КА GNSS-R, в т.ч.: FSSCat [16], китайские спутники BuFeng-1 (BF-1) A/B [17], спутник DoT-1 компании Surrey Satellite Technology Ltd (SSTL) [18], спутник Fengyun-3E [19].

² <https://glonass-iac.ru/> (in Russ.). Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

³ <https://podaac.jpl.nasa.gov/CYGNSS>. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

¹ <https://earth.esa.int/eogateway/missions/iceye>. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

Китайская Народная Республика 8 мая 2023 г. запустила КА Jilin-1 Kuanfu 01C, который принимает отраженные от земной поверхности сигналы ГНСС для определения средней высоты поверхности моря, высоты волн, характеристик ледового покрова, параметров приповерхностного ветра и солёности моря⁴.

Сеть наноспутников Spire является наиболее современной, всего на платформе LEMUR было запущено более 165 микроспутников формата 3U/6U. Аппараты GNSS-R на этой платформе ежедневно собирают по 4 Гб данных, которые принимаются более чем тридцатью наземными станциями⁵.

Направление ДЗЗ по отраженным сигналам ГНСС развивается в таких проектах как PRETTY⁶, HydroGNSS⁷, SNOOP⁸ и других.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Решение задачи круглосуточного мониторинга земной поверхности при любых погодных условиях целесообразно осуществить путем создания созвездия бистатических РЛС с приемником на КА. Для создания таких перспективных российских КА, которые будут по результатам приема и обработки отраженных от поверхности сигналов ГНСС решать задачи построения радиоизображений поверхности Земли, измерения высоты геоида, обнаружения разрывных ледовых полей и пр., необходимо определить метод оптимальной обработки отраженных сигналов, энергетику сигнала, структуру аппаратуры приема и обработки данных, включая параметры антенной системы.

Синтезируем алгоритм формирования радиолокационного изображения в космической бистатической РСА в режиме приема отраженных сигналов спутников ГНСС, который позволяет получать радиоизображения взволнованной поверхности вблизи зеркальных точек отражения. Алгоритм сформируем для аддитивной модели уравнения наблюдения, включающей полезный сигнал $S(t)$ на входе антенны и шум $n(t)$, t – время. При этом будем полагать, что взаимная интерференция сигналов несущественна и может быть учтена в шуме приемника.

Выделим произвольную бистатическую пару « i -й приемник – k -й передатчик» (рис. 1).

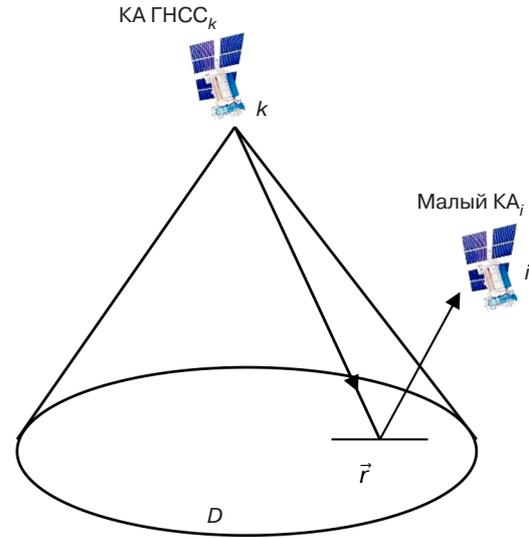


Рис. 1. Геометрия наблюдения. \vec{r} – отражающая точка в пределах D – зондируемой поверхности

Сигнал k -го КА ГНСС, отраженный от поверхности и принимаемый i -й приемной антенной, после отражения от точки поверхности с координатами \vec{r} определяется выражением:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{ik}(t, \vec{r}) = & \dot{K}_k(t, \vec{r}) \dot{K}_i(t, \vec{r}) \times \\ & \times \dot{G}_k(t, \vec{r}) \dot{G}_i(t, \vec{r}) \dot{F}_{ik}[t, \vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})] \times \\ & \times \dot{S}_{0k}[t - \tau_k(t, \vec{r}) - \tau_i(t, \vec{r})] \times \\ & \times \exp\{j\omega_{0k}[t - \tau_k(t, \vec{r}) - \tau_i(t, \vec{r})]\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\dot{S}_{ik}(t, \vec{r})$ – траекторный сигнал; $\dot{K}_k(t, \vec{r})$ и $\dot{K}_i(t, \vec{r})$ – коэффициенты, учитывающие ослабление и искажение сигнала при распространении через атмосферу от передающей антенны к точке поверхности \vec{r} и от точки поверхности \vec{r} до приемной антенны соответственно; $\dot{G}_k(t, \vec{r})$, $\dot{G}_i(t, \vec{r})$ – комплексные функции, учитывающие влияние диаграммы направленности передающей и приемной антенн; $\dot{F}_{ik}[t, \vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})]$ – комплексный коэффициент отражения элемента \vec{r} , зависящий от его электрофизических параметров $\vec{\lambda}(\vec{r})$ для бистатической пары ik ; $\dot{S}_{0k}(t) \exp(j\omega_{0k}t)$ – излучаемый k -м спутником сигнал, $\omega_{0k} = 2\pi f_{0k}$ – несущая частота излучаемого сигнала k -го передатчика; $\tau_k(t, \vec{r})$ и $\tau_i(t, \vec{r})$ – время запаздывания, связанное с прохождением сигнала от передающей антенны к точке поверхности с координатами \vec{r} и от точки поверхности к приемной антенне соответственно.

Для практических расчетов опорных функций при синтезировании апертуры в бистатической РСА целесообразно пренебречь изменением функций

⁴ <https://news.cgtn.com/news/2022-05-08/China-launches-first-bipolar-GNSS-R-ocean-survey-payload-19RYzG3bmCs/index.html>. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

⁵ <https://spirespaceservices.spire.com/>. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

⁶ <https://space.oscar.wmo.int/satellites/view/pretty>. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

⁷ <https://www.eoportal.org/satellite-missions/hydrognss>. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

⁸ <https://esto.nasa.gov/invest/snoopi>. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

$\dot{G}(t, \vec{r})$ и $\dot{K}(t, \vec{r})$ за время распространения импульса, функцию $\dot{F}[t, \lambda(t, \vec{r})] = \dot{F}[\vec{r}, \lambda(\vec{r})]$ будем считать постоянной на интервале наблюдения. В результате сигнал $S_{Dik}(t)$, отраженный от зондируемой поверхности D , будет представлять собой реальную часть предельного значения суммы сигналов, отраженных от ее отдельных элементов $\dot{S}_{ik}(t, \vec{r})$:

$$S_{Dik}(t) = \operatorname{Re} \int_D \dot{F}_{ik}[\vec{r}, \lambda(\vec{r})] \dot{K}_{ik}[t, \vec{r}] \dot{G}_{ik}[t, \vec{r}] \dot{S}_{0k}[t - \tau_{ik}(t, \vec{r})] \times (2) \\ \times \exp\{j\omega_{0k}[t - \tau_{ik}(t, \vec{r})]\} d\vec{r},$$

где для удобства восприятия произведения функций, зависящих от параметров передатчика и приемника, объединены в одну функцию с индексами $(\cdot)_{ik}$.

Несмотря на то, что отражение происходит от всех элементов поверхности, для которых пересекаются следы диаграмм направленности передающей и приемной антенн, наибольший вклад будут вносить компоненты, находящиеся вблизи точки зеркального отражения [20].

Особенностью реализации режима обработки (2) является определение разности хода между прямым и отраженным сигналом. Обработка прямого сигнала КА и сигнала, отраженного от зеркальной области, позволяет не только определять параметры поверхности, но и рассчитывать текущую высоту геоида в этой точке. Число таких точек зеркального отражения совпадает с числом видимых КА ГНСС, сами точки перемещаются в пространстве при взаимном движении передатчика и приемника относительно подстилающей поверхности.

Возможность решения задачи измерения высоты была показана зарубежными и российскими исследователями [21–23]. Использование высокоточных эфемерид КА ГНСС позволяет решить задачу альтиметрии с высокой точностью. Например, параметры движения центра масс КА ГНСС ГЛОНАСС определяются с погрешностями (по уровню вероятности 0.997) не более 0.5 м вдоль орбиты, 0.2 м по бинормали к орбите и 0.1 м по радиус-вектору⁹.

2. ОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В БИСТАТИЧЕСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ РЛС

Без потери общности результатов, положим, что полезный сигнал, излученный навигационным спутником, отраженный от земной поверхности и принимаемый на борту наноспутника $\operatorname{Re} \dot{S}_{Dik}(t)$, наблюдается на фоне аддитивного нормального белого шума

$n_{ik}(t)$, статистические характеристики которого можно полагать одинаковыми для всех пар « i -й приемник – k -й передатчик»:

$$u_{ik}(t) = \operatorname{Re} \dot{S}_{Dik}(t) + n_{ik}(t). \quad (3)$$

Оптимальные оценки параметров поверхности $\vec{\lambda}(\vec{r})$, содержащихся в отраженном сигнале, для функционально-детерминированных моделей поверхности найдем в рамках метода максимального правдоподобия по максимуму функционала

$$p[u_{ik}(t) / \dot{F}_{ik}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})]] = C \exp \left\{ -\frac{1}{N_{0ik}} \int_0^T [u_{ik}(t) - \operatorname{Re} \int_D \dot{F}_{ik}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})] \dot{S}_{ik}(t, \vec{r}) d\vec{r}]^2 dt \right\}, \quad (4)$$

где N_{0ik} – спектральная плотность мощности аддитивного шума, T – интервал наблюдения (синтезирования апертуры), C – нормирующий множитель.

Пусть оценивается один из параметров $\lambda(\vec{r})$, если априорные сведения о нем отсутствуют либо они распределены с максимальной энтропией (равномерно в области Λ , $\lambda \in \Lambda$), то оптимальные оценки находятся из решения вариационного уравнения $\frac{\delta \{p[u_{ik}(t) / \dot{F}_{ik}[\vec{r}, \lambda(\vec{r})]]\}}{\delta \lambda(\vec{r})} = 0$. Вариационное уравнение возникает вследствие того, что оценивается не постоянное значение параметра, а функция пространственных координат $\dot{F}_{ik}[\vec{r}, \lambda(\vec{r})]$.

После ряда вычислений решение уравнения (4), которое определяет принцип синтезирования апертуры в бистатической РЛС, в компактном виде можно записать так:

$$\dot{Y}_{ik}(\vec{r}) = \int_0^T u_{ik}(t) \dot{S}_{ik}^*(t, \vec{r}) dt = \int_D \dot{F}_{ik}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})] \dot{\Psi}_{ik}(\vec{r}, \vec{r}_1) d\vec{r}_1, \quad (5)$$

где $\dot{Y}_{ik}(\vec{r}) = \int_0^T u_{ik}(t) \dot{S}_{ik}^*(t, \vec{r}) dt$ – оптимальный выходной эффект в данной бистатической паре, $\dot{\Psi}_{ik}(\vec{r}, \vec{r}_1) = \int_0^T \dot{S}_{ik}(t, \vec{r}) \dot{S}_{ik}^*(t, \vec{r}_1) dt$ – пространственная функция неопределенности бистатической РСА.

Результат обработки (5) – это радиолокационное изображение поверхности, в котором содержится информация о ее электрофизических параметрах.

⁹ <http://www.glonass-svoevp.ru/index.php?lang=ru> (in Russ.). Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

Таблица. Характеристики сигналов ГЛОНАСС. *I* – синфазная и *Q* – квадратурная компоненты сигнала

Несущая частота f_0 , МГц	1602 + 0.5625 <i>k</i> <i>k</i> = -7 ... +6		1600.995			1248.06			1246 + 0.4375 <i>k</i> <i>k</i> = -7 ... +6		1202.025	
	<i>I/Q</i>	<i>Q</i>	<i>I</i>	<i>Q</i>	<i>I</i>	<i>Q</i>	<i>I</i>	<i>Q</i>	<i>I</i>	<i>Q</i>	<i>I</i>	
Тип	L1OF (L1 CT)	L1SF (L1 BT)	L1OC [L1OCd]	L1OC [L1OCp]	L1SC	L2q (L2OC) [L2КСИ (L2OCd)]	L2q (L2OC) [L2OCp]	L2SC	L2OF (L2 CT)	L2SF (L2 BT)	L3OC [L3OCp]	L3OC [L3OCd]
Полоса, МГц	1.022	–	2.046	4.092	–	2.046	4.092	–	1.022	–	20.46	20.46
Средняя мощность сигнала \bar{A} , дБВт	-161	–	-161.5	-161.5	–	-161.5	-161.5	–	-161	–	-101.5	-101.5

Формирование независимых оценок по всем бистатистическим парам позволяет получить $N = N_{КА} N_S$ измерений (4), где $N_{КА}$ – число видимых КА ГНСС, N_S – количество излучаемых (квази)ортогональных сигналов. Для ГНСС ГЛОНАСС¹⁰ сигналы L1OF, L1OC (L1OCd и L1OCp), L2q (L2OCd, L2OCp), L2OF, L3OC (L3OCd и L3OCp) при видимости 10 навигационных спутников позволяют получить 80 значений $\dot{Y}_{ik}(\vec{r})$ (таблица).

В результате обработки (5) на выходе будет присутствовать аддитивная смесь четырех компонент:

- сигнальная часть для конкретного сигнала заданного передатчика $\dot{S}_{ik}(t, \vec{r})$

$$\dot{Y}_{S_{ik}}(\vec{r}) = \int_D \dot{F}_{ik}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})] \dot{\Psi}_{ik}(\vec{r}, \vec{r}_1) d\vec{r}_1; \quad (6)$$

- шумовая составляющая

$$\dot{Y}_{n_{ik}}(\vec{r}) = \int_0^T n_{ik}(t) \dot{S}_{ik}^*(t, \vec{r}) dt; \quad (7)$$

- интерференционная составляющая для одного и того же спутника, излучающего M сигналов $\dot{S}_{imk}^*(t, \vec{r}_1)$, не совпадающих с $\dot{S}_{ik}(t, \vec{r})$:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{IS_{ik}}(\vec{r}) &= \\ &= \sum_{m=1 \dots M} \int_D \dot{F}_{ik}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})] \int_0^T \dot{S}_{ik}(t, \vec{r}) \dot{S}_{imk}^*(t, \vec{r}_1) dt d\vec{r}_1; \end{aligned} \quad (8)$$

- межспутниковая интерференционная составляющая, вызванная приемом сигналов прочих спутников ГНСС, облучающих участок поверхности D :

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{in_{ik}}(\vec{r}) &= \\ &= \sum_{n=1 \dots N} \int_D \dot{F}_{ik}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})] \int_0^T \dot{S}_{ik}(t, \vec{r}) \dot{S}_{in}^*(t, \vec{r}_1) dt d\vec{r}_1. \end{aligned} \quad (9)$$

Исследование влияния квазиортогональных сигналов, в т.ч. с учетом различных траекторий движения КА ГНСС, может быть выполнено численно или экспериментально. Эксперимент позволяет оценить статистические характеристики шумовых и интерференционных составляющих при сравнении эффектов на выходе коррелятора, полученных в безэховой камере при работе по одному имитируемому сигналу КА ГНСС, и этих же эффектов при работе по сигналам реальных спутников ГНСС. Такой эксперимент, проведенный во Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений¹¹ [24], показал, что, в соответствии с законом больших чисел, совокупный эффект (8)–(9) может быть аппроксимирован нормальным случайным процессом. Следовательно, учесть эти составляющие можно, используя упрощенную модель (3) с повышением уровня шума на 1–2 дБ.

3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ БИСТАТИЧЕСКОЙ РСА С ПРИЕМОМ ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ ГНСС

При расчете энергетических параметров будем полагать, что в приемнике многопозиционной РСА осуществляется оптимальная обработка – согласованная фильтрация в соответствии с (5). Тогда на выходе системы обработки будут формироваться две составляющие: сигнальная \dot{Q}_s и шумовая \dot{Q}_n .

¹⁰ <https://russianspacesystems.ru/bussines/navigation/glonass/interfeysnyy-kontrolnyy-dokument/> (in Russ.). Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

¹¹ <https://www.vniiftri.ru/> (in Russ.). Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

Мощность сигнальной составляющей P_s запишем в виде:

$$P_s = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \cdot \frac{P_{av} G_T}{R_1^2} \cdot \frac{G_R T_{Rs}}{R_2^2} \sigma^o \Delta s, \quad (10)$$

где P_{av} – средняя мощность излучаемого передатчиком сигнала; T_{Rs} – интервал синтезирования апертуры; R_1, R_2 – расстояние от отражающей точки до передатчика и приемника, соответственно; G_T, G_R – коэффициенты усиления передающей и приемной антенны, σ^o – удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) поверхности, Δs – размер участка разрешения на зондируемой поверхности.

В случае, когда используется зеркальное отражение от поверхности, в качестве размера участка необходимо использовать след на поверхности пространственной функции неопределенности навигационного сигнала $\dot{\Psi}_{ik}(\vec{r}, \vec{r}_1)$.

Шумовая составляющая выходного эффекта (4) \dot{Q}_n определяется спектральной плотностью мощности помех на входе приемного устройства N_0 :

$$N_0 = t_A k T_0, \quad (11)$$

где t_A – относительная шумовая температура антенны, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T_0 – температура антенны.

В уравнении (10) основные параметры определяются геометрией наблюдения и характеристиками передатчиков – навигационных спутников. Дополнительно надо определить удельную эффективную поверхность рассеяния поверхности.

Математическая модель отражения от взволнованной морской поверхности основывается на двухмасштабной модели поверхности [25]. Для описания отражения навигационного сигнала от морской поверхности предложена модель ВА-PTSM [26], которая учитывает поляризацию сигналов и при этом обеспечивает большую скорость вычислений при совпадении результатов с двухмасштабной моделью. Для этой модели результаты расчета УЭПР для круговой поляризации сигнала КА ГНСС приведены на рис. 2.

Для оценки энергетических параметров можно использовать экспериментально полученные данные (рис. 3 и 4).

Результаты расчета (9) с использованием данных [28] показывают, что обеспечить отношение сигнал/шум 4 дБ для времени накопления 1 мс в областях до 10° относительно зеркальной области отражения можно при использовании антенны с усилением 14 дБи. Полученные результаты близки к полученным экспериментально при скорости ветра менее 5 м/с [29] (рис. 5).

Оптимальное время синтезирования апертуры ограничивается двумя факторами. С одной стороны, необходимо осуществить накопление сигнала с уровнем, достаточным для обеспечения требуемой точности оценок параметров поверхности и высоты геоида (не менее 10 мс). С другой стороны, за время синтезирования параметры поверхности не должны существенно измениться, чтобы в уравнении (3) комплексный коэффициент отражения не стал функцией времени. При размещении на сверхмалом КА типа cubesat¹² усиление антенны будет не более 10–16 дБи (размер антенны соответствует одной грани аппарата 3U-6U), если не используется конструкция с раскрывающейся антенной, как на КА SPIRE. Учитывая возможность совместной обработки по видимым КА с получением дополнительного увеличения отношения сигнал/шум на 4–7 дБ, время синтезирования апертуры можно сократить до 100 мс, что значительно упростит реализацию синтезирования апертуры на борту.

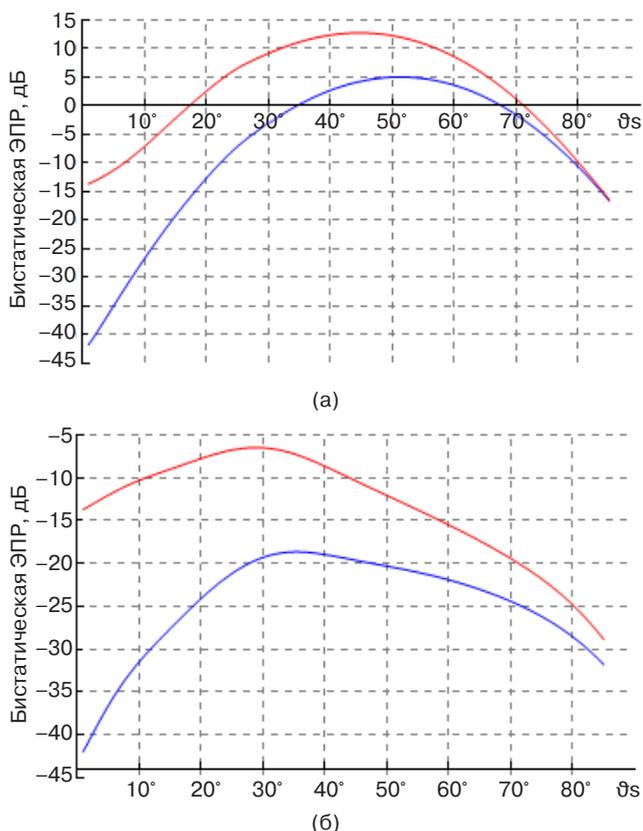


Рис. 2. Зависимость величины УЭПР при приеме отраженного сигнала с правой круговой поляризацией (красная линия) и левой круговой поляризацией (синяя линия) от вертикального угла рассеяния θ_s для сигнала с частотой 1.58 ГГц при совпадающей вертикальной проекции бистатического угла наблюдения 45° и горизонтальной проекции бистатического угла 0° (а) и 30° (б) [26]

¹² https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2018/01/cubesatdesignspecificationrev14_12022-02-09.pdf. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

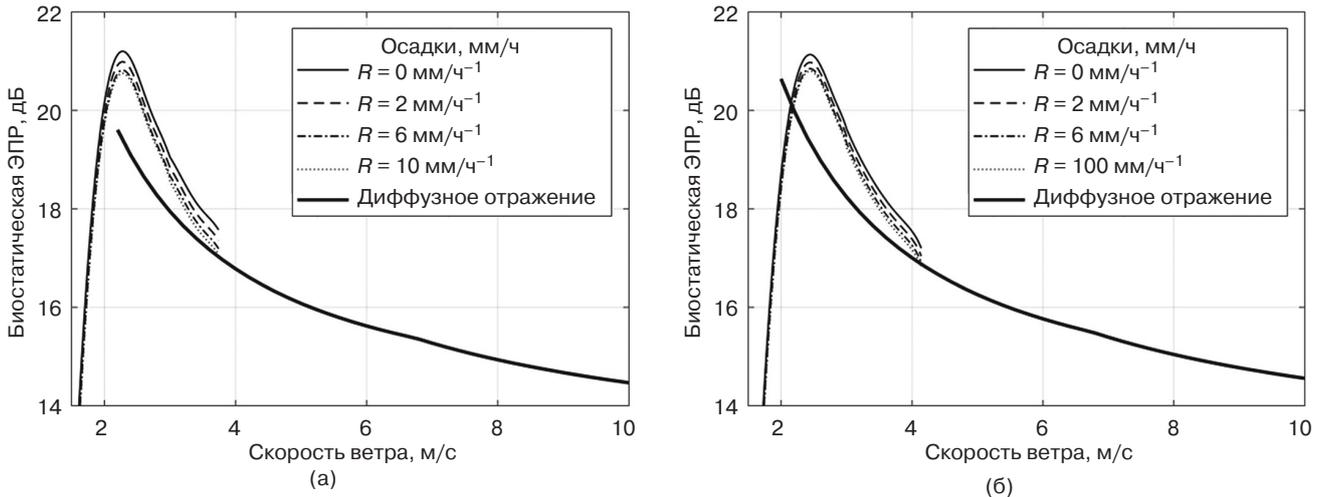


Рис. 3. Зависимость бистатической эффективной площади рассеяния (ЭПР) сигнала GPS¹³ L1 для морской поверхности от скорости приводного ветра при различном уровне осадков R для горизонтальной проекции бистатического угла 0° (а) и 30° (б), по данным [27]

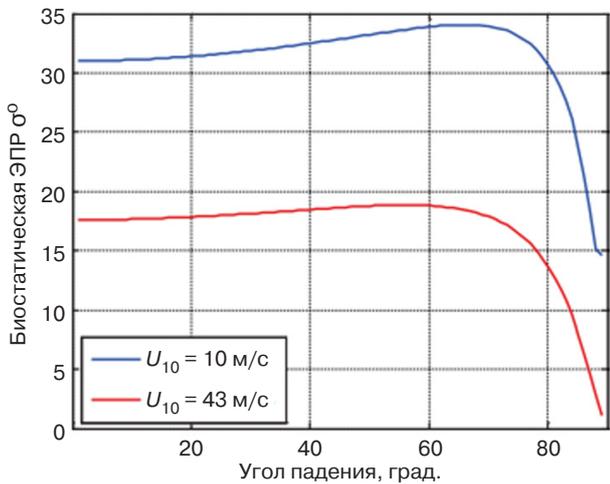


Рис. 4. Зависимость бистатической ЭПР сигнала GPS L1 для морской поверхности в области зеркального отражения от угла рассеяния для двух скоростей приводного ветра U_{10} , по данным σ^0 [26]¹⁴

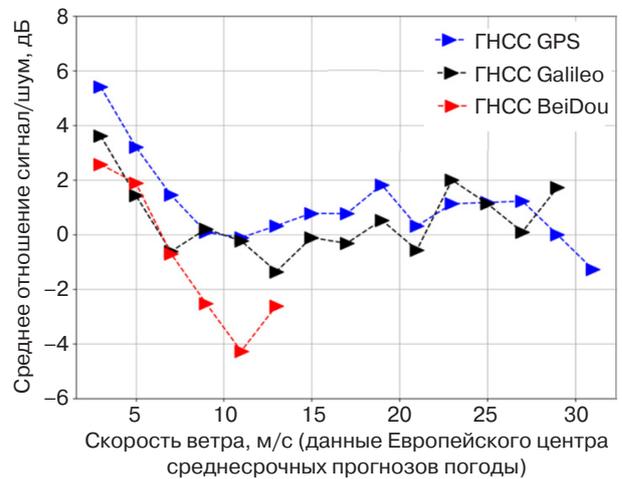


Рис. 5. Средние значения отношения сигнал/шум при различной скорости ветра (для ГНСС GPS, Galileo¹⁵, BeiDou¹⁶) [29]

4. СТРУКТУРА БОРТОВОЙ БИСТАТИЧЕСКОЙ РЛС

Для корректной обработки сигналов бортовая РЛС должна содержать (рис. 6):

- антенную систему (АС) для приема прямого сигнала ГНСС, необходимого для формирования опорного сигнала (стандартную навигационную антенну);

- антенную систему приема сигнала с левой круговой поляризацией, поляризационной развязкой не хуже 20 дБ, коэффициентом усиления не менее 10 дБи;
- программно-определяемый приемник;
- стандартный космический приемник ГНСС с возможностью выдачи координатной информации для контроля положения КА. Эта информация используется в корреляторе для формирования

¹³ <https://www.gps.gov/>. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

¹⁴ Cyclone global navigation satellite system (CYGNSS). Algorithm Theoretical Basis Document Level 2 Wind Speed Retrieval. https://cygnss.engin.umich.edu/wp-content/uploads/sites/534/2021/07/148-0138-ATBD-L2-Wind-Speed-Retrieval-R6_release.pdf. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

¹⁵ <https://galileognss.eu/>. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

¹⁶ <https://glonass-iac.ru/guide/gnss/beidou.php> (in Russ.). Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

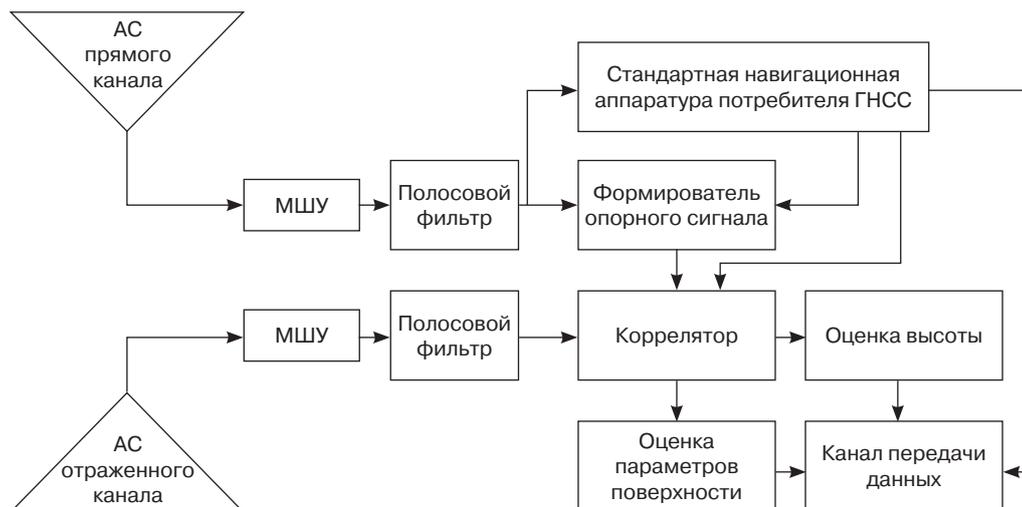


Рис. 6. Предлагаемая структура бистатической РЛС, работающей по отраженным от поверхности сигналам ГНСС. МШУ – малошумящий усилитель

опорных функций, что позволит значительно снизить требования к обработке на борту;

- канал передачи данных с устройством хранения информации для передачи данных на наземные станции.

Для увеличения отношения сигнал/шум целесообразно использовать патч-антенну. Размеры предлагаемой антенны превышают используемую в CYGNSS (6 патч-элементов). Элементы расположены «мозаикой», однако их также можно расположить параллельно, как это сделано в иностранных КА GNSS-R, и уменьшить размер антенны на КА (рис. 7).

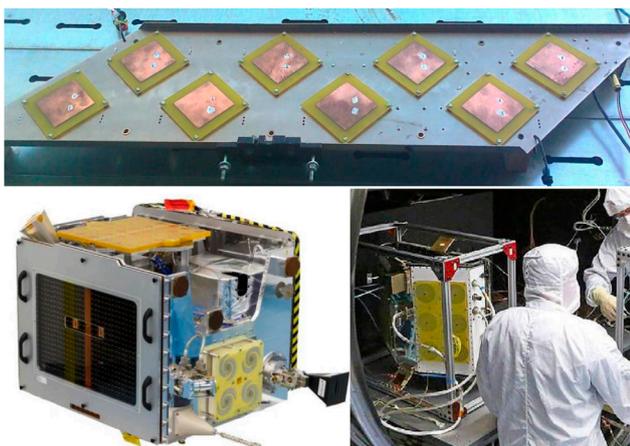


Рис. 7. Предлагаемая модель антенной решетки из патч-антенн (вверху) [14], антенна спутника TDS-1 (внизу слева) [11] и CYGNSS (внизу справа)¹⁷ [28]

¹⁷ <https://www.eoportal.org/satellite-missions/techdemo-sat-1#spacecraft>. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

Для приемника на КА целесообразно иметь две антенны, направленные влево и вправо от подспутниковой точки под углом 30° относительно вертикали, что позволит обрабатывать сигналы слева и справа от трека приемного КА. При этом в схеме на рис. 6 добавляется еще один приемный канал отраженного от поверхности сигнала ГНСС.

5. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА БИСТАТИЧЕСКИХ РСА

Основной недостаток неизлучающей РЛС заключается в том, что мощность передатчиков относительно невелика. В CYGNSS для обеспечения требуемой энергетики используется наиболее простой метод – обрабатывается сигнал в области зеркального отражения, что обеспечивает увеличение уровня сигнала на 15–30 дБ относительно других областей. Размер области, которая вносит основной вклад в отраженный сигнал, зависит не только от геометрии наблюдения, но и от характеристик подстилающей поверхности (рис. 8) [30]. Для морского льда, поверхности озер и болотистой местности характерна малая область отражения в координатах «задержка – доплеровский сдвиг» вследствие зеркального отражения. Для растительного покрова и открытого моря характерна широкая область отражения. Следовательно, информация о типе отражающей поверхности содержится не только в абсолютном значении мощности отраженного сигнала, но и в его распределении в координатах «задержка – доплеровский сдвиг», что позволяет создавать новые методы анализа радиолокационных изображений для определения водно-ледовой обстановки.

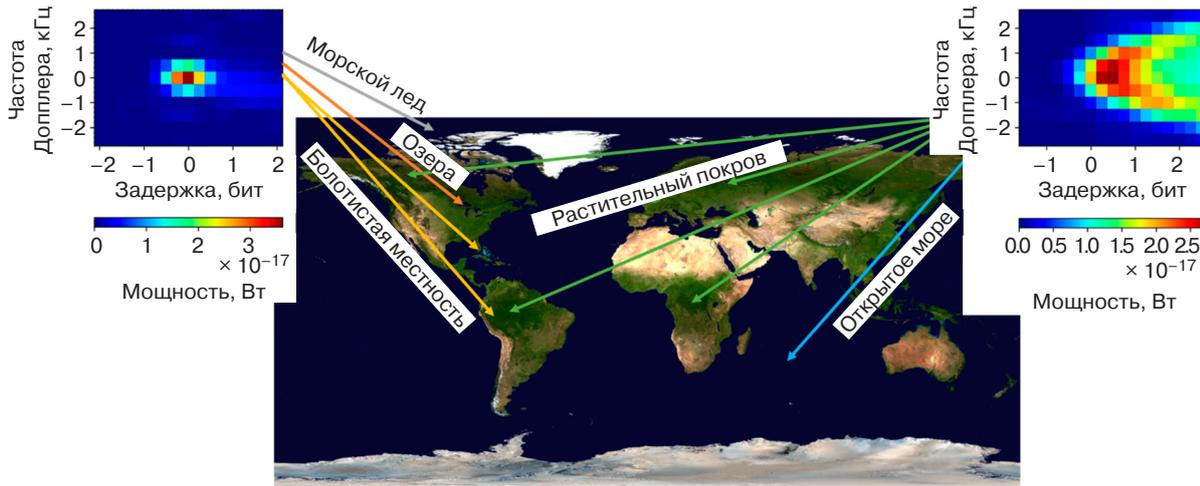


Рис. 8. Два примера изображений в координатах «задержка – доплеровский сдвиг» для двух различных типов поверхностей [30]

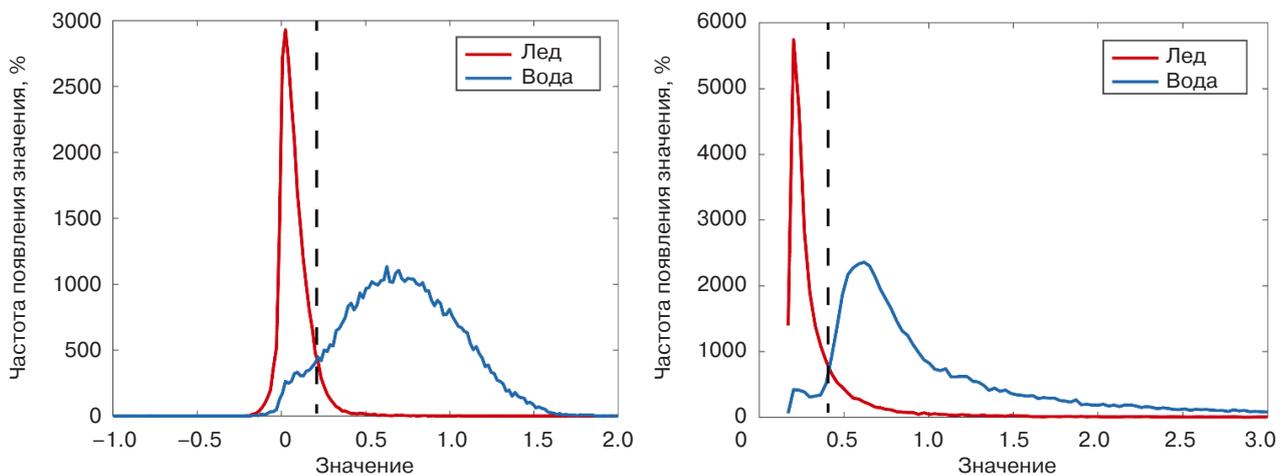


Рис. 9. Гистограммы распределения мощности отражения в координатах «дальность – доплеровский сдвиг» (слева) и переднего фронта отраженного импульса (справа)

Еще одним признаком различия сигнала ГНСС, отраженного от воды и льда, может служить гистограмма уровня отраженного сигнала от типа поверхности (рис. 9) [31].

Синтез алгоритма оптимальной совместной обработки осуществляется с учетом электродинамических моделей поверхности при наблюдении ее под различными углами и на различных несущих частотах [32].

Для увеличения отношения сигнал/шум, необходимого для повышения качества оценок, предлагается использовать когерентное накопление сигнала (в режиме синтезирования апертуры антенны), которое позволит осуществлять наблюдение в широком секторе углов и «выровнять» пространственное разрешение в дальномерном и азимутальном направлении.

Дополнительные возможности открываются за счет приема сигналов всех видимых КА ГНСС, их раздельной обработки (синтезирование апертуры)

с последующим комплексированием измерений на этапе вторичной обработки (оценки параметров поверхности, обнаружение объектов и построение радиолокационных изображений).

В отличие от описанных в литературе методов обработки отраженных сигналов КА ГНСС, необходимо обрабатывать сигналы на всех несущих частотах, что позволяет сформировать независимые данные об отражающей способности поверхности и скорректировать ионосферные искажения. Это особенно важно при определении высоты геоида для подспутниковой точки или точки зеркального отражения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен анализ систем дистанционного зондирования земной поверхности по отраженным сигналам навигационных КА. Показано, что зарубежные группировки таких КА функционируют на орбите,

решая задачи определения параметров водной поверхности и почвы. Данные с этих КА находятся в открытом доступе и доступны для анализа. С учетом ограниченных возможностей по созданию метеорологических спутниковых группировок, КА мониторинга водной поверхности и определения высот геоида, основанные на приеме отраженных сигналов спутниковых навигационных систем, позволили бы решить ряд важных научных и практических задач. В работе представлен алгоритм оптимальной обработки отраженных от поверхности сигналов навигационных систем с учетом особенностей функционирования КА ГНСС, включая наличие интерференционной составляющей. Рассчитанные численно значения энергетического потенциала бистатической РСА для сигналов круговой поляризации совпадают с экспериментальными значениями, приведенными в иностранной литературе.

Предложено выбирать время синтезирования апертуры порядка 100 мс с учетом постоянства параметров отражающей поверхности. Дальнейшее увеличение отношения сигнал/шум необходимо осуществлять за счет совместной обработки по всему видимому созвездию.

Предложена структура бортовой бистатической РЛС, в которой, в отличие от известных аналогов, используется навигационный приемник для

формирования опорного сигнала. Использование вычисленных в навигационной аппаратуре задержек и доплеровских сдвигов частот позволяет упростить коррелятор сигналов. Это позволяет снизить нагрузку на программно-определяемый приемник с сохранением требуемого качества оценок.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 23-67-10007.

ACKNOWLEDGMENTS

The study was financially supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-67-10007.

Вклад авторов

А.В. Ксэндзук – цели и задачи исследования, методы обработки, энергетический потенциал.

В.Ф. Фатеев – идея исследования, разработка структуры бистатической РЛС, формулировка выводов.

Authors' contributions

A.V. Ksendzук – developing aims and objectives, theoretical background, processing methods, and energy potential.

V.F. Fateev – the research idea, developing the structure of on-board bistatic radar system, and formulating the conclusions.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krieger G., Moreira A., Fiedler H., et al. TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2007;45(11):3317–3341. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.900693>
2. Hall C.D., Cordey R.A. Multistatic scatterometry. In: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 'Remote Sensing: Moving Toward the 21st Century'*. IEEE. 1988. V. 1. P. 561–562. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1988.570200>
3. Cardellach E., Fabra F., Nogués-Correig O., et al. GNSS-R ground-based and airborne campaigns for ocean, land, ice, and snow techniques: Application to the GOLD-RTR data sets. *Radio Sci.* 2011;46(6):RS0C04. <http://doi.org/10.1029/2011RS004683>
4. Martin-Neira M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry. *ESA J.* 1993;17(4):331–355.
5. Ксэндзук А.В. Использование спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS для дистанционного зондирования поверхности. *Электромагнитные волны и электронные системы.* 2003;8(5):8–15.
6. Фатеев В.Ф., Сахно И.В. Применение навигационных КА GPS/ГЛОНАСС в составе многопозиционных РЛС обзора земной поверхности. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение.* 2004;47(3):27–30.
7. Фатеев В.Ф., Сахно И.В. Способ получения радиолокационного изображения земной поверхности при помощи многопозиционной радиолокационной системы с синтезированной апертурой антенны: пат. № 2278398 РФ. Заявка № 2004121076/092006; заявл. 06.07.2004; опубл. 20.06.2006.
8. Фатеев В.Ф., Ксэндзук А.В. Наземно-космическая радиолокационная система: пат. № 113022 РФ. Заявка № 2010154058/07; заявл. 29.12.20104; опубл. 27.01.2012.
9. Бахолдин В.С., Гаврил Д.А., Шалдаев А.В. Алгоритмы формирования радиолокационных изображений земной поверхности при использовании сигналов ГЛОНАСС. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение.* 2012;55(9):24–29.
10. Ксэндзук А.В., Фатеев В.Ф., Герасимов П.А., Новиков В.А. Совместная обработка в многопозиционных РСА. Результаты экспериментальных исследований. В сб.: *Радиолокационное исследование природных сред: труды XXVIII Всероссийского симпозиума.* СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского. 2013;10(2):218–222.
11. Di Simone A., Park H., Riccio D., Camps A. Sea target detection using spaceborne GNSS-R delay-Doppler maps: Theory and experimental proof of concept using TDS-1 data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* 2017;10(9):4237–4255. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2705350>

12. Hu C., Benson C.R., Park H., et al. Detecting targets above the Earth's surface using GNSS-R delay Doppler maps: Results from TDS-1. *Remote Sens.* 2019;11(19):2327. <https://doi.org/10.3390/rs11192327>
13. Фатеев В.Ф., Ксендзук А.В., Обухов П.С., Крапивкин Г.И., Тимошенко Г.В., Король Г.Н., Фатеев О.В., Новиков В.А., Герасимов П.А., Шахалов К.С. Многопозиционная радиолокационная система с синтезированием апертуры антенны по отраженным сигналам ГНСС «ГЛОНАСС». *Электромагнитные волны и электронные системы.* 2012;17(5):62–68.
14. Фатеев В.Ф., Ксендзук А.В., Обухов П.С., Крапивкин Г.И., Тимошенко Г.В., Король Г.Н., Новиков В.А., Герасимов П.А., Шахалов К.С. Экспериментальный бистатический радиолокационный комплекс. *Электромагнитные волны и электронные системы.* 2012;17(5):58–61.
15. Freeman V., Masters D., Jales P., et al. Earth Surface Monitoring with Spire's New GNSS Reflectometry (GNSS-R) CubeSats. In: *22nd EGU General Assembly Conference Abstracts.* 2020. id. 13766. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-13766>
16. Camps A., Golkar A., Gutierrez A., et al. Fsscatt, the 2017 Copernicus Masters' "Esa Sentinel Small Satellite Challenge" Winner: A federated polar and soil moisture tandem mission based on 6U Cubesats. In: *IGARSS 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.* IEEE; 2018. P. 8285–8287. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518405>
17. Jing C., Niu X., Duan C., et al. Sea surface wind speed retrieval from the first Chinese GNSS-R mission: Technique and preliminary results. *Remote Sens.* 2019;11(24):3013. <https://doi.org/10.3390/rs11243013>
18. Unwin M., Rawinson J., King L., et al. GNSS-reflectometry activities on the DoT-1 microsatellite in preparation for the hydrognss mission. In: *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS.* IEEE; 2021. P. 1288–1290. <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9554352>
19. Xia J., Bai W., Sun Y., et al. Calibration and wind speed retrieval for the Fengyun-3 E Meteorological Satellite GNSS-R Mission. In: *2021 IEEE Specialist Meeting on Reflectometry using GNSS and other Signals of Opportunity (GNSS+R).* IEEE; 2021. P. 25–28. <https://doi.org/10.1109/GNSSR53802.2021.9617699>
20. Cheng Z., Jin T., Chang X., et al. Evaluation of spaceborne GNSS-R based sea surface altimetry using multiple constellation signals. *Front. Earth Sci.* 2023;10:1079255. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1079255>
21. Munoz-Martin J.F., Portero A.P., Camps A., et al. Snow and ice thickness retrievals using GNSS-R: Preliminary results of the MOSAiC experiment. *Remote Sens.* 2020;12(24):4038. <https://doi.org/10.3390/rs12244038>
22. Nogués O.C., Munoz-Martin J.F., Park H., et al. Improved GNSS-R altimetry methods: Theory and experimental demonstration using airborne dual frequency data from the microwave interferometric reflectometer (MIR). *Remote Sens.* 2021;13(20):4186. <https://doi.org/10.3390/rs13204186>
23. Фатеев В.Ф., Лопатин В.П. Космический бистатический радиолокатор контроля профиля поверхности океана на основе сигналов ГНСС. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение.* 2019;62(5):484–491. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2019-62-5-484-491>
24. Лопатин В.П., Фатеев В.Ф. Исследование бистатической радиолокационной системы на основе сигналов GPS/ГЛОНАСС в безэховой камере. *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.* 2019;670:64–68.
25. Волосюк В.К., Кравченко В.Ф. *Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации.* М.: Физматлит; 2008. 351 с.
26. Di Martino G., Di Simone A., Iodice A., Riccio D. Bistatic scattering from anisotropic rough surfaces via a closed-form two-scale model. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2020;59(5):3656–3671. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3021784>
27. Asgarimehr M., Zavorotny V.U., Wickert J., Reich S. Can GNSS reflectometry detect precipitation over oceans? *Geophys. Res. Lett.* 2018;45(22):12585–12592. <https://doi.org/10.1029/2018GL079708>
28. Gleason S., Ruf C.S., O'Brien A.J., McKague D.S. The CYGNSS Level 1 calibration algorithm and error analysis based on on-orbit measurements. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* 2019;12(1): 37–49. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2832981>
29. Nan Y., Ye S., Liu J., et al. Signal-to-noise ratio analyses of spaceborne GNSS-reflectometry from Galileo and BeiDou satellites. *Remote Sens.* 2022;14(1):35. <https://doi.org/10.3390/rs14010035>
30. Rodriguez-Alvarez N., Munoz-Martin J.F., Morris M. Latest Advances in the Global Navigation Satellite System—Reflectometry (GNSS-R) Field. *Remote Sens.* 2023;15(8):2157. <https://doi.org/10.3390/rs15082157>
31. Cartwright J., Banks Ch.J., Srokosz M. Sea Ice Detection Using GNSS-R Data From TechDemoSat-1. *JGR Oceans.* 2019. V. 124. Iss. 8. P. 5801–5810. <https://doi.org/10.1029/2019JC015327>
32. Потапов А.А., Кузнецов В.А., Аликулов Е.А. Анализ способов комплексирования изображений, формируемых многодиапазонными радиолокационными станциями с синтезированной апертурой. *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника.* 2021;24(3):6–21. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-6-21>

REFERENCES

1. Krieger G., Moreira A., Fiedler H., et al. TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2007;45(11):3317–3341. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.9006693>
2. Hall C.D., Cordey R.A. Multistatic scatterometry. In: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 'Remote Sensing: Moving Toward the 21st Century'.* IEEE. 1988. V. 1. P. 561–562. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1988.570200>
3. Cardellach E., Fabra F., Nogués-Correig O., et al. GNSS-R ground-based and airborne campaigns for ocean, land, ice, and snow techniques: Application to the GOLD-RTR data sets. *Radio Sci.* 2011;46(6):RS0C04. <http://doi.org/10.1029/2011RS004683>

4. Martin-Neira M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry. *ESA J.* 1993;17(4):331–355.
5. Ksendzук A.V. Use of GLONASS/GPS satellite navigation systems for remote surface sensing. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy = Electromagnetic Waves and Electronic Systems.* 2003;8(5):8–15 (in Russ.).
6. Fateev V.F., Sakhno I.V. Application of navigating space vehicles GPS/GLONASS in structure multi-position radar the review of a terrestrial surface. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = J. Instrument Eng.* 2004;47(3): 27–30 (in Russ.).
7. Fateev V.F., Sakhno I.V. *Method for Producing Radiolocation Image of Earth Surface by Means of Using Multi-Positional Radiolocation System with Synthesized Aperture of Antenna:* RF Pat. 2278398. Publ. 20.06.2006 (in Russ.).
8. Fateev V.F., Ksendzук A.V. *Ground-Space Radar System:* RF Pat. 113022. Publ. 27.01.2012 (in Russ.).
9. Baholdin V.S., Gavril D.A., Shaldaev A.V. Algorithms of pattern SAR images of the Earth surface with the use of GLONASS signals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = J. Instrument Eng.* 2012;55(9):24–29 (in Russ.).
10. Ksendzук A.V., Fateev V.F., Gerasimov P.A., Novikov V.A. Multiposition radar coprocessing techniques. Experimental results. In: *Radar Research of Natural Environments: Proceedings of the 28th All-Russian Symposium.* St. Petersburg: Mozhaisky Military Space Academy. 2013;10(2):218–222 (in Russ.).
11. Di Simone A., Park H., Riccio D., Camps A. Sea target detection using spaceborne GNSS-R delay-Doppler maps: Theory and experimental proof of concept using TDS-1 data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* 2017;10(9):4237–4255. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2705350>
12. Hu C., Benson C.R., Park H., et al. Detecting targets above the Earth's surface using GNSS-R delay Doppler maps: Results from TDS-1. *Remote Sens.* 2019;11(19):2327. <https://doi.org/10.3390/rs11192327>
13. Fateev V.F., Ksendzук A.V., Obukhov P.S., et al. Multi-position non-radiating SAR with GNSS GLONASS transmitters. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy = Electromagnetic Waves and Electronic Systems.* 2012;17(5):62–68 (in Russ.).
14. Fateev V.F., Ksendzук A.V., Obukhov P.S., et al. Experimental bistatic radar complex. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy = Electromagnetic Waves and Electronic Systems.* 2012;17(5):58–61 (in Russ.).
15. Freeman V., Masters D., Jales P., et al. Earth Surface Monitoring with Spire's New GNSS Reflectometry (GNSS-R) CubeSats. In: *22nd EGU General Assembly Conference Abstracts.* 2020. id. 13766. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-13766>
16. Camps A., Golkar A., Gutierrez A., et al. Fsscatt, the 2017 Copernicus Masters' "Esa Sentinel Small Satellite Challenge" Winner: A federated polar and soil moisture tandem mission based on 6U Cubesats. In: *IGARSS 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.* IEEE; 2018. P. 8285–8287. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518405>
17. Jing C., Niu X., Duan C., et al. Sea surface wind speed retrieval from the first Chinese GNSS-R mission: Technique and preliminary results. *Remote Sens.* 2019;11(24):3013. <https://doi.org/10.3390/rs11243013>
18. Unwin M., Rawinson J., King L., et al. GNSS-reflectometry activities on the DoT-1 microsatellite in preparation for the hydrognss mission. In: *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS.* IEEE; 2021. P. 1288–1290. <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9554352>
19. Xia J., Bai W., Sun Y., et al. Calibration and wind speed retrieval for the Fengyun-3 E Meteorological Satellite GNSS-R Mission. In: *2021 IEEE Specialist Meeting on Reflectometry using GNSS and other Signals of Opportunity (GNSS+R).* IEEE; 2021. P. 25–28. <https://doi.org/10.1109/GNSSR53802.2021.9617699>
20. Cheng Z., Jin T., Chang X., et al. Evaluation of spaceborne GNSS-R based sea surface altimetry using multiple constellation signals. *Front. Earth Sci.* 2023;10:1079255. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1079255>
21. Munoz-Martin J.F., Portero A.P., Camps A., et al. Snow and ice thickness retrievals using GNSS-R: Preliminary results of the MOSAiC experiment. *Remote Sens.* 2020;12(24):4038. <https://doi.org/10.3390/rs12244038>
22. Nogués O.C., Munoz-Martin J.F., Park H., et al. Improved GNSS-R altimetry methods: Theory and experimental demonstration using airborne dual frequency data from the microwave interferometric reflectometer (MIR). *Remote Sens.* 2021;13(20):4186. <https://doi.org/10.3390/rs13204186>
23. Fateev V.F., Lopatin V.P. Space bistatic radar to monitor the ocean surface profile based on GNSS signals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = J. Instrument Eng.* 2019;62(5):484–491 (in Russ.). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2019-62-5-484-491>
24. Lopatin V.P., Fateev V.F. Study of a bistatic radiolocation system on the basis of GPS/GLONASS signals in echo-free camera. *Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy.* 2019;670:64–68 (in Russ.).
25. Volosyuk V.K., Kravchenko V.F. *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya i radiolokatsii (Statistical Theory of Radio-engineering Systems of Remote Sensing and Radiolocation).* Moscow: Fizmatlit; 2008. 351 p. (in Russ.).
26. Di Martino G., Di Simone A., Iodice A., Riccio D. Bistatic scattering from anisotropic rough surfaces via a closed-form two-scale model. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2020;59(5):3656–3671. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3021784>
27. Asgarimehr M., Zavorotny V.U., Wickert J., Reich S. Can GNSS reflectometry detect precipitation over oceans? *Geophys. Res. Lett.* 2018;45(22):12,585–12,592. <https://doi.org/10.1029/2018GL079708>
28. Gleason S., Ruf C.S., O'Brien A.J., McKague D.S. The CYGNSS Level 1 calibration algorithm and error analysis based on on-orbit measurements. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* 2019;12(1): 37–49. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2832981>
29. Nan Y., Ye S., Liu J., et al. Signal-to-noise ratio analyses of spaceborne GNSS-reflectometry from Galileo and BeiDou satellites. *Remote Sens.* 2022;14(1):35. <https://doi.org/10.3390/rs14010035>

30. Rodriguez-Alvarez N., Munoz-Martin J.F., Morris M. Latest Advances in the Global Navigation Satellite System— Reflectometry (GNSS-R) Field. *Remote Sens.* 2023;15(8):2157. <https://doi.org/10.3390/rs15082157>
31. Cartwright J., Banks Ch.J., Srokosz M. Sea Ice Detection Using GNSS-R Data From TechDemoSat-1. *JGR Oceans.* 2019. V. 124. Iss. 8. P. 5801–5810. <https://doi.org/10.1029/2019JC015327>
32. Potapov A.A., Kuznetsov V.A., Alikulov E.A. Methods for Complexing Images Formed by Multi-Band Synthetic Aperture Radars. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika = Journal of the Russian Universities. Radioelectronics.* 2021;24(3):6–21 (in Russ.). <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-6-21>

Об авторах

Ксендзук Александр Владимирович, д.т.н., заведующий базовой кафедрой № 346 – радиоэлектронных систем, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ks_alex@mail.ru. Scopus Author ID 56628472300, SPIN-код РИНЦ 2389-6036, <https://orcid.org/0009-0001-7084-1433>, <https://www.researchgate.net/profile/Alexander-Ksendzuk-2>

Фатеев Вячеслав Филиппович, д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки РФ, начальник научно-технического центра «Метрологического обеспечения наземной и космической гравиметрии», ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ») (141570, Россия, Московская область, г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево (промзона ВНИИФТРИ). E-mail: office@vniiftri.ru. Scopus Author ID 56442213300, SPIN-код РИНЦ 5385-8126, <https://orcid.org/0000-0001-7902-0212>

About the authors

Alexander V. Ksendzuk, Dr. Sci. (Eng.), Head of Department Radioelectronic systems, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ks_alex@mail.ru. Scopus Author ID 56628472300, RSCI SPIN-code 2389-6036, <https://orcid.org/0009-0001-7084-1433>, <https://www.researchgate.net/profile/Alexander-Ksendzuk-2>

Vyacheslav F. Fateev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Head of Scientific and Technical Center for Metrological Support of Ground and Space Gravimetry, Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radioengineering (VNIIFTRI) (industrial zone of VNIIFTRI, settlement Mendeleev, Solnechnogorsk, Moscow oblast, 141570 Russia). E-mail: office@vniiftri.ru. Scopus Author ID 56442213300, RSCI SPIN-code 5385-8126, <https://orcid.org/0000-0001-7902-0212>

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.391.072
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-84-95>
EDN OJGGRP



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Исследование влияния корректирующих кодов на когерентный прием сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при наличии шумовой и гармонической помех

В.З. Нгуен[@]

Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам
[@] Автор для переписки, e-mail: nguyenvandungvtdt@lqdtu.edu.vn

Резюме

Цели. Сигналы с многопозиционной фазовой манипуляцией (М-ФМ), обладающие хорошими спектральными и энергетическими характеристиками, успешно применяются во многих системах передачи информации, таких, как системы спутниковой связи, GPS, ГЛОНАСС, DVB/DVB-S2, в наборе стандартов беспроводной связи IEEE 802.11. В каналах радиосвязи на полезный сигнал действуют, кроме шумовой, разные помехи, одной из них является гармоническая, которая при большой интенсивности практически разрушает прием сигналов М-ФМ. Одним из важных требований, предъявляемых к качеству передачи данных, является устойчивость системы к ошибкам. Существуют разные способы повышения качества передачи информации, один из которых – применение технологии корректирующего кодирования. Цель статьи – оценка помехоустойчивости когерентного демодулятора сигналов М-ФМ с применением кодов Хэмминга (7,4) и (15,11) и сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби (7,5) при приеме сигналов М-ФМ в условиях воздействия в канале связи шумовой и гармонической помех.

Методы. Использованы методы статистической радиотехники, теории оптимального приема сигналов и компьютерного имитационного моделирования.

Результаты. С помощью компьютерного имитационного моделирования получены экспериментальные зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум и от интенсивности гармонической помехи для когерентного приема сигналов М-ФМ в канале с шумовой и гармонической помехами без применения корректирующих кодов и с применением кодов Хэмминга (7,4) и (15,11), сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби (7,5).

Выводы. Показано, что применение корректирующих кодов позволяет эффективно исправлять ошибки при наличии шумовой и гармонической помех с малой интенсивностью. При большой интенсивности помехи коррекция неэффективна. Результаты могут служить важным руководством при проектировании надежных и энергоэффективных систем передачи информации.

Ключевые слова: многопозиционная фазовая манипуляция, корректирующие коды, код Хэмминга, сверточный код, алгоритм декодирования Витерби, помехоустойчивость, вероятность битовой ошибки, гармоническая помеха

• Поступила: 19.11.2023 • Доработана: 11.02.2024 • Принята к опубликованию: 22.05.2024

Для цитирования: Нгуен В.З. Исследование влияния корректирующих кодов на когерентный прием сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при наличии шумовой и гармонической помех. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):84–95. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-84-95>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Studying the influence of correction codes on coherent reception of M-PSK signals in the presence of noise and harmonic interference

Van D. Nguyen [@]

Le Quy Don Technical University, Ha Noi, Vietnam

[@] *Corresponding author, e-mail: nguyenvandungvtdt@lqdtu.edu.vn*

Abstract

Objectives. Signals with multiple phase shift keying (M-PSK) exhibiting good spectral and energy characteristics are successfully used in many information transmission systems. These include satellite communication systems, GPS, GLONASS, DVB/DVB-S2, and a set of IEEE 802.11 wireless communication standards. In radio communication channels, the useful signal is affected by various interferences in addition to noise. One of these is harmonic interference. As a result, high intensity harmonic interference practically destroys the reception of M-PSK signals. One of the important requirements for the quality of data transmission is the system error tolerance. There are different ways of improving the quality of information transmission. One of these is the use of corrective encoding technology. The aim of the paper is to assess the noise immunity of a coherent demodulator of M-PSK signals using Hamming codes (7,4) and (15,11), and convolutional encoding with Viterbi decoding algorithm (7,5) when receiving M-PSK signals under noise and harmonic interference in the communication channel.

Methods. The methods of statistical radio engineering, optimal signal reception theory and computer simulation modeling were used.

Results. Experimental dependencies of the bit error rate on the signal-to-noise ratio and on the intensity of harmonic interference of coherent reception of M-PSK signals in a channel with noise and harmonic interference were obtained using computer simulation modeling. This was done without using correction codes and with Hamming code (7,4) and (15,11) and convolutional encoding with Viterbi decoding algorithm (7,5).

Conclusions. It is shown that the application of the correction codes effectively corrects errors in the presence of noise and harmonic interference with lower intensity. The correction is ineffective in the presence of high intensity interference. These results can provide important guidance in designing the reliable and energy efficient system.

Keywords: multiple phase shift keying, correction codes, Hamming code, convolutional encoding, Viterbi decoding algorithm, noise immunity, bit error rate, harmonic interference

• Submitted: 19.11.2023 • Revised: 11.02.2024 • Accepted: 22.05.2024

For citation: Nguyen V.D. Studying the influence of correction codes on coherent reception of M-PSK signals in the presence of noise and harmonic interference. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):84–95. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-84-95>

Financial disclosure: The author has no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих исследованиях рассматривалось влияние кодирования на помехоустойчивость приема многопозиционных сигналов, когда в каналах радиосвязи действует всего лишь белый гауссовский шум. Авторы в [1–13] определили эффективность разных корректирующих кодов, применяемых в кодировании каналов с различными методами модуляции. Энергетический выигрыш от применения таких кодов на конкретном примере кода Хэмминга и сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби представлен в табл. 1.

На рис. 1 показаны теоретические зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 (E_b – средняя битовая энергия, N_0 – спектральная плотность мощности шума) для приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией (М-ФМ) в канале с аддитивным белым гауссовским шумом. Сплошные линии соответствуют вероятности битовой ошибки без применения корректирующих кодов, штриховые линии – вероятности битовой ошибки с применением кода Хэмминга (7,4), штрихпунктирные – с применением кода Хэмминга (15,11), а пунктирные линии – вероятности битовой ошибки с применением сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби (7,5) [14].

В работах [15–18] проведен анализ влияния гармонической помехи при приеме сигналов с многопозиционными видами манипуляции. Показано, что гармоническая помеха является самой опасной, когда ее частота совпадает с частотой полезного сигнала. В результате ее воздействия помехоустойчивость сильно снижается.

Важнейший вклад в решение данной проблемы вносит теория помехоустойчивого кодирования. Цель работы – оценка помехоустойчивости когерентного

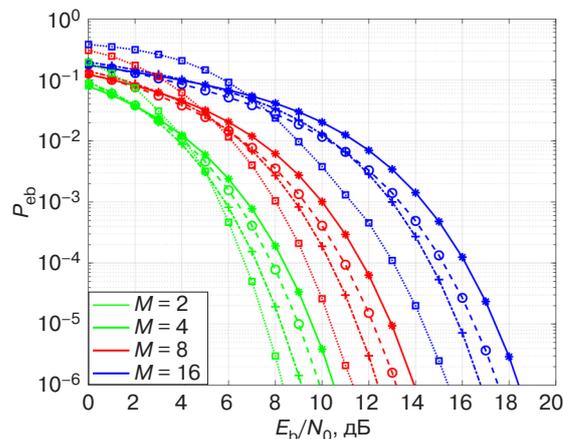


Рис. 1. Теоретические зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 для приема сигналов М-ФМ в канале с аддитивным белым гауссовским шумом

демодулятора сигналов М-ФМ с применением кодов Хэмминга (7,4) и (15,11) и сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби (7,5) при приеме сигналов М-ФМ в условиях воздействия в канале связи шумовой и гармонической помех.

1. МОДЕЛЬ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

На рис. 2 изображена структурная схема цифровой системы передачи информации. В блоках кодера канала и декодера канала реализуется алгоритм кодирования и декодирования по коду Хэмминга или по алгоритму Витерби. Схемы формирования сигналов М-ФМ строятся на основе универсального квадратурного модулятора, а схема приема реализуется на основе многоканального когерентного демодулятора, оптимального по критерию максимального правдоподобия (рис. 3) [19, 20].

Таблица 1. Энергетический выигрыш в отношении сигнал/шум (дБ) при $P_{eb} = 10^{-5}$

Режимы модуляции	Код Хэмминга (7,4)	Код Хэмминга (15,11)	Сверточное кодирование с алгоритмом декодирования Витерби (7,5)
2-ФМ, 4-ФМ	0.56	1.31	1.99
8-ФМ	0.78	1.49	2.59
16-ФМ	0.91	1.57	3.07

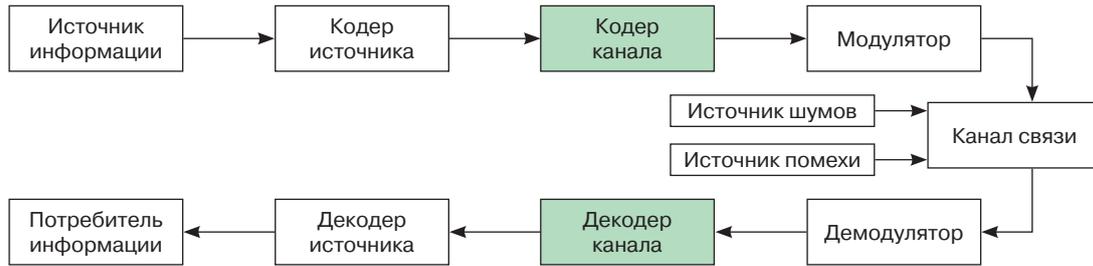


Рис. 2. Структурная схема цифровой системы передачи информации

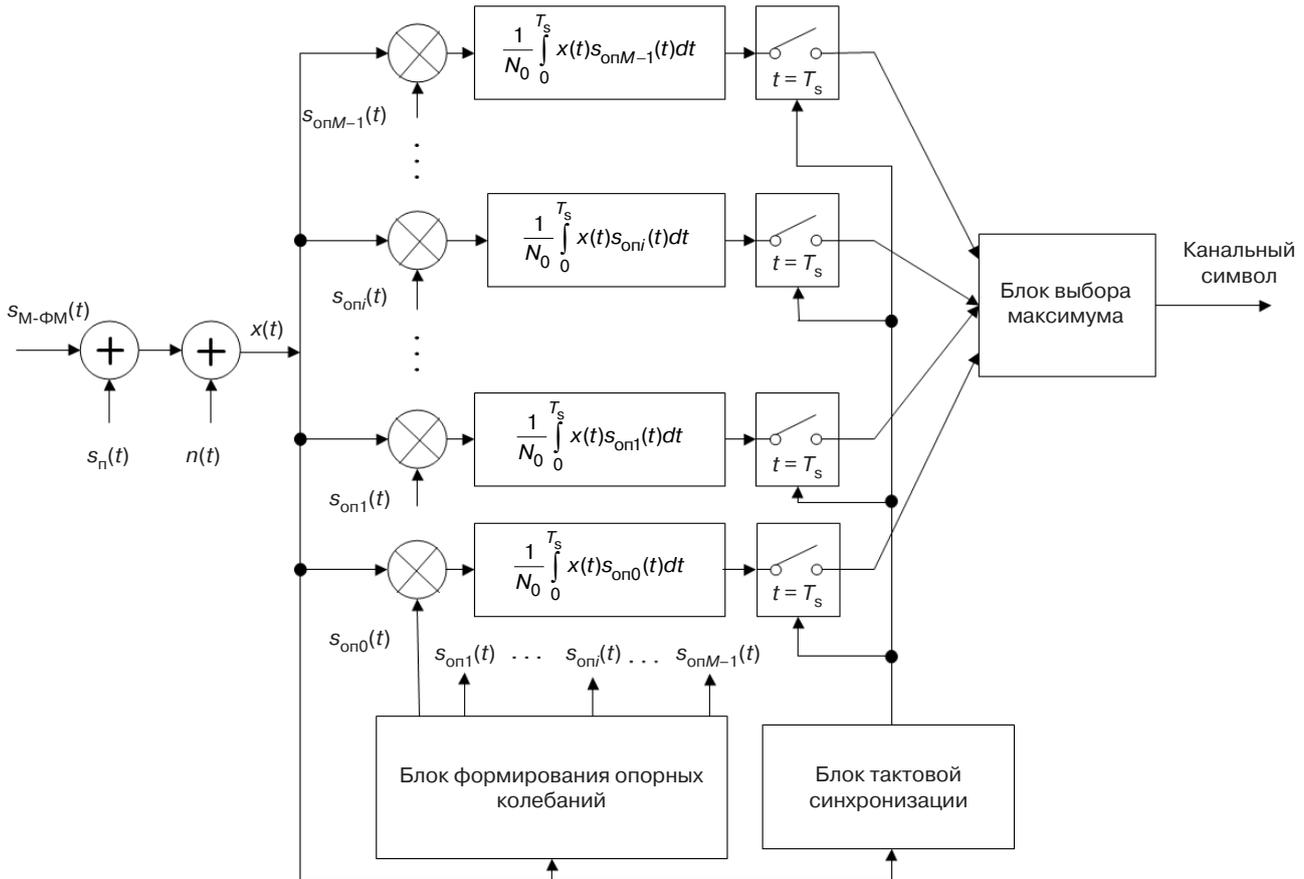


Рис. 3. Структурная схема когерентного демодулятора сигналов М-ФМ.
 t – время; $x(t)$ – входной процесс; $s_{онi}(t)$ – опорные сигналы

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИГНАЛОВ М-ФМ, ШУМОВОЙ И ГАРМОНИЧЕСКОЙ ПОМЕХ

Математические модели сигналов М-ФМ, шумовой и гармонической помех опишем следующим образом:

а) Математическая модель сигналов М-ФМ

Сигнал М-ФМ на тактовом интервале T_s , равном длительности канального символа, несущего информацию о $k = \log_2 M$ информационных битах, может принимать одно из M возможных значений:

$$s_i(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_i + \varphi_c), \varphi_i = \frac{i2\pi}{M},$$

$$t \in (0, T_s], i = \overline{0, M-1},$$

где $A_0 = \sqrt{2E_s / T_s}$ – амплитуда сигнала; $E_s = kE_b$ – энергия канального символа; ω_0 – несущая частота; φ_c – начальное фазовое смещение сигнального созвездия сигнала.

Сигнальные созвездия М-ФМ с применением кодирования Грея представлены на рис. 4. На них отмечены сигнальные точки, соответствующие канальным символам, и пунктиром изображены границы областей принятия решения.

б) Модель шумовой помехи

В качестве шумовой помехи рассмотрим стационарный случайный процесс $n(t)$ типа «белый гауссовский шум» с дельта-функцией корреляции и нулевым средним значением.

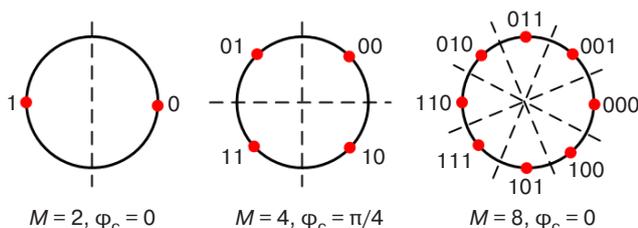


Рис. 4. Сигнальные созвездия многопозиционной фазовой манипуляции

в) Модель гармонической помехи

$$s_{\text{п}}(t) = \mu A_0 \cos[(\omega_0 + \Delta\omega_{\text{п}})t + \varphi_{\text{п}}],$$

где μ – относительная интенсивность; $\varphi_{\text{п}}$ – случайная начальная фаза помехи, равномерно распределенная на полуинтервале $(-\pi, +\pi]$; $\Delta\omega_{\text{п}}$ – расстройка помехи относительно центральной частоты спектра полезного сигнала ω_0 .

3. КОДЫ ХЭММИНГА (7,4) И (15,11)

На рис. 5 представлены диаграммы Вена для связи между битами проверки четности и битами данных в кодах Хэмминга.

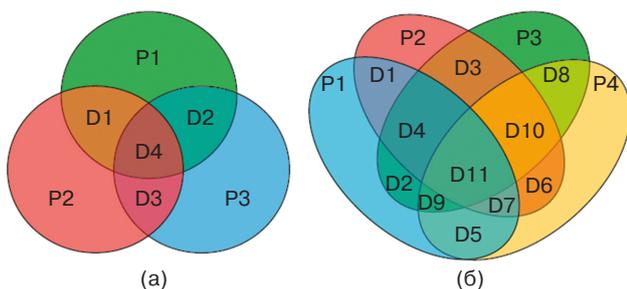


Рис. 5. Диаграммы Вена, описывающие биты проверки четности и биты данных: (а) код Хэмминга (7,4), (б) код Хэмминга (15,11) [21]

Существует некоторый набор параметров кода Хэмминга:

- число символов, предназначенных для проверки m ($m \geq 3$),
- число символов кодового сообщения $n = 2^m - 1$,
- число информационных символов $k = 2^m - m - 1$,
- возможность исправления ошибок $t = 1$ ($d_{\text{min}} = 3$),
- кодовая скорость $R = k/n$.

Применяемые в данной работе параметры кодов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры кодов Хэмминга

Параметры	Код Хэмминга (7,4)	Код Хэмминга (15,11)
m	3	4
n	7	15
k	4	11
R	4/7	11/15

4. СВЕРТОЧНОЕ КОДИРОВАНИЕ С АЛГОРИТМОМ ДЕКОДИРОВАНИЯ ВИТЕРБИ (7,5)

На рис. 6 представлена схема сверточного кодера со скоростью $1/2$, $K = 3$, генераторный полином – $[7,5]$, восьмеричный.

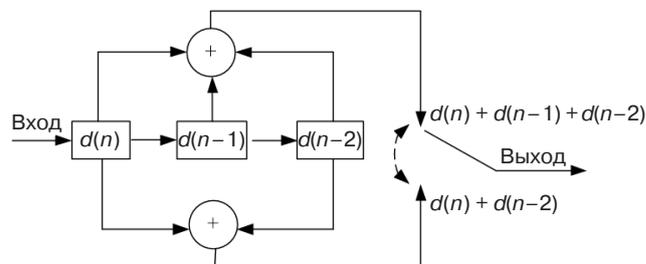


Рис. 6. Схема сверточного кодера

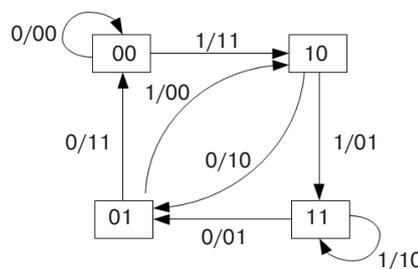


Рис. 7. Диаграмма состояний сверточного кодирования

Существует некоторый набор параметров сверточного кода:

- число информационных символов k ,
- число передаваемых в канал связи символов за один такт поступления на кодер информационного символа n ,
- относительная скорость кода $R = k/n$,
- длина ограничения K ,
- число состояний сверточного кода $2^K - 1$.

Применяемые в данной работе параметры сверточного кода приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры сверточного кода

Параметры	Значение
n	1
k	2
K	3
R	1/2

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

5.1. Моделирование

Моделирование канала передачи информации было проведено с параметрами, представленными в табл. 4.

Блок-схема алгоритма моделирования показана на рис. 8.

Таблица 4. Параметры моделирования

Параметры	Значение
Отношение сигнал/шум	$E_b/N_0 = 0 \div 25$ дБ
Канал связи	Аддитивный гауссовский белый шум, гармоническая помеха
Относительная интенсивность помехи	$\mu = 0 \div 1$
Начальная фаза помехи	$\varphi = 0 \div 2\pi$
Отношение частоты дискретизации к несущей частоте	$f_d/f_0 = 20$, где $f_0 = \omega_0/2\pi$
Число информационных битов	$N = 1080000$
Режимы модуляции	2-ФМ, 4-ФМ, 8-ФМ, 16-ФМ
Типы кодов	Код Хэмминга (7,4), код Хэмминга (15,11), сверточное кодирование с алгоритмом декодирования Витерби (7,5)

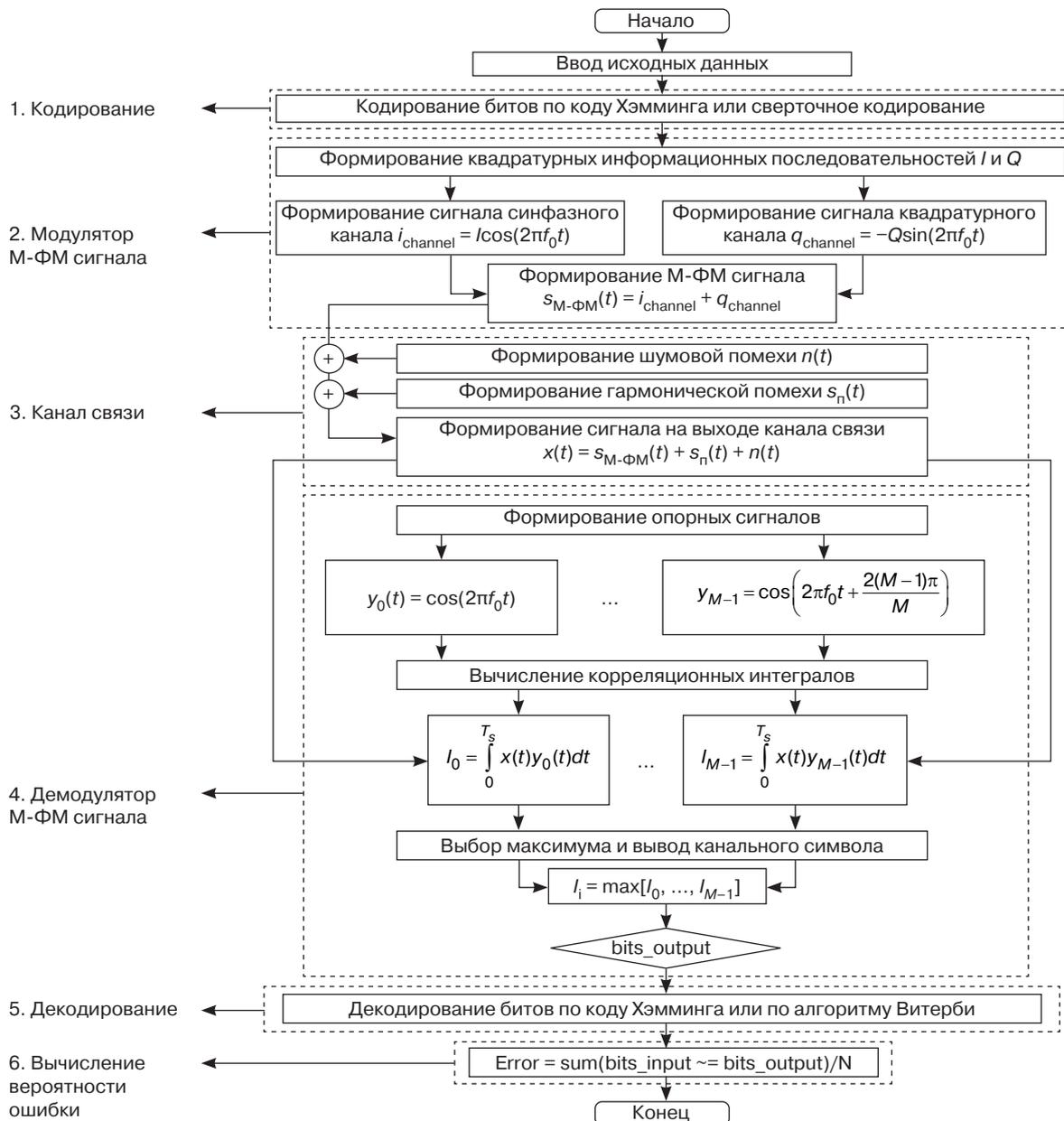


Рис. 8. Блок-схема алгоритма моделирования

При моделировании была учтена связь между отношениями сигнал/шум с кодированием и без кодирования:

$$\frac{E_{cb}}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} + 10 \lg \left(\frac{k}{n} \right) \text{ (дБ)}.$$

5.2. Результаты имитационного моделирования

На рис. 9 представлены экспериментальные зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 и от относительной интенсивности гармонической помехи μ при когерентном приеме сигналов М-ФМ с использованием кодов Хэмминга для разной скорости кодирования.

Сплошные линии соответствуют вероятности битовой ошибки без применения кода Хэмминга, штриховые линии – вероятности битовой ошибки с применением кода Хэмминга (7,4), а штрихпунктирные – с применением кода Хэмминга (15,11).

На рис. 10 представлены экспериментальные зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 и от относительной интенсивности гармонической помехи μ при когерентном приеме сигналов М-ФМ при использовании сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби. Сплошные линии соответствуют вероятности битовой ошибки без применения кодирования, пунктирные линии – вероятности битовой ошибки при применении сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби (7,5).

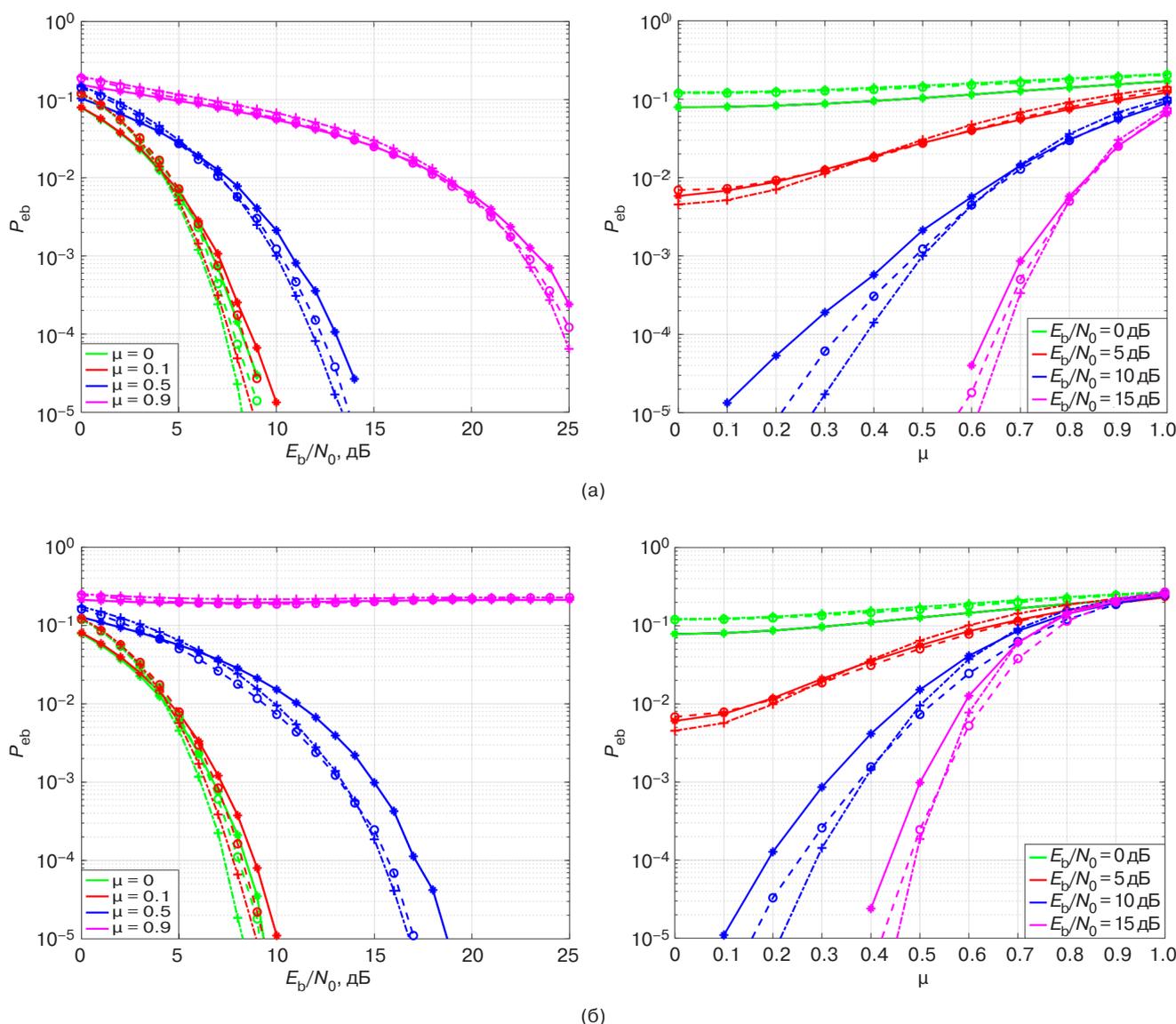


Рис. 9 (начало). Экспериментальные зависимости P_{eb} от E_b/N_0 (слева) и от μ (справа) при когерентном приеме сигналов М-ФМ с использованием кодов Хэмминга: (а) 2-ФМ; (б) 4-ФМ;

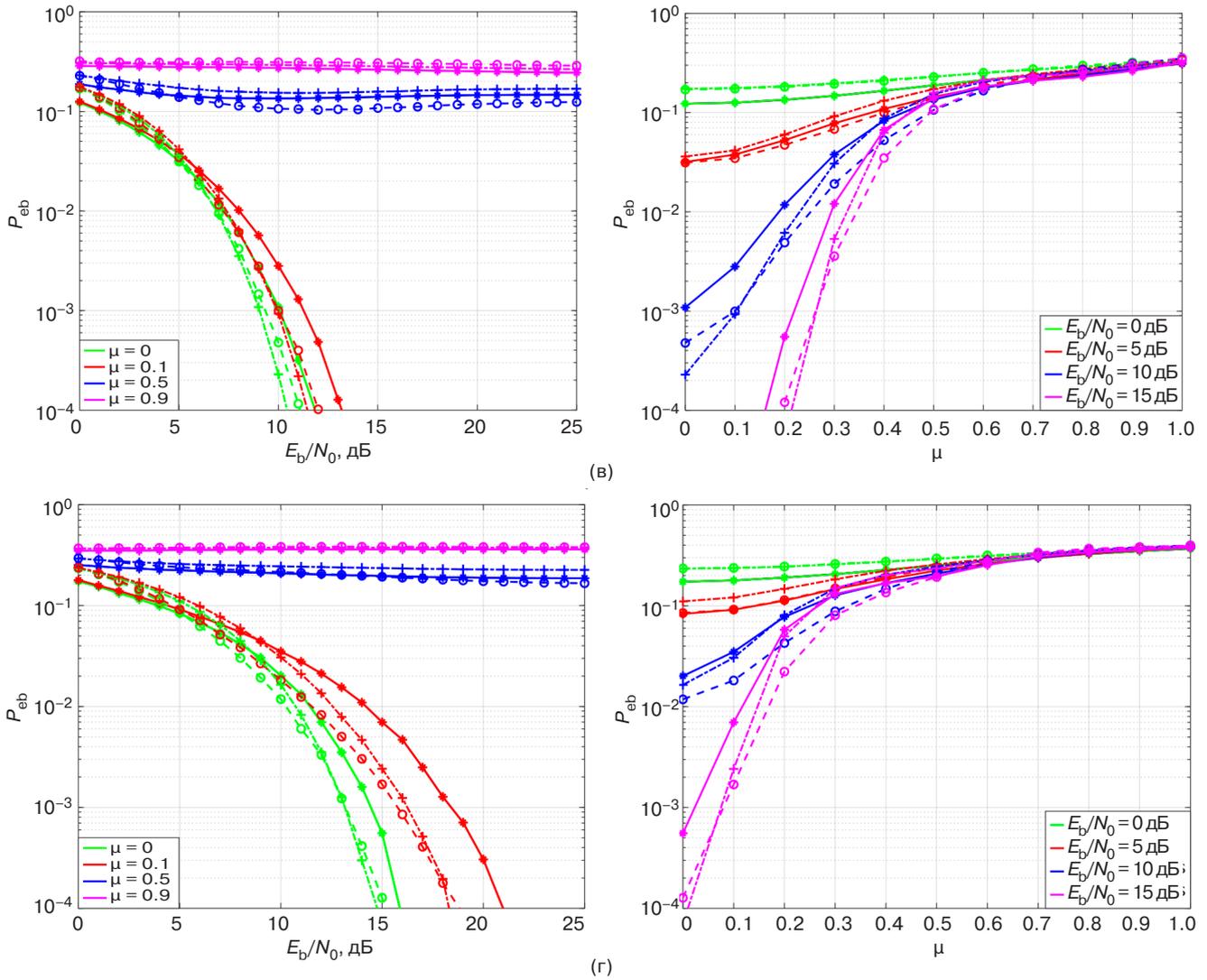


Рис. 9 (окончание). Экспериментальные зависимости P_{eb} от E_b/N_0 (слева) и от μ (справа) при когерентном приеме сигналов М-ФМ с использованием кодов Хэмминга: (в) 8-ФМ; (г) 16-ФМ

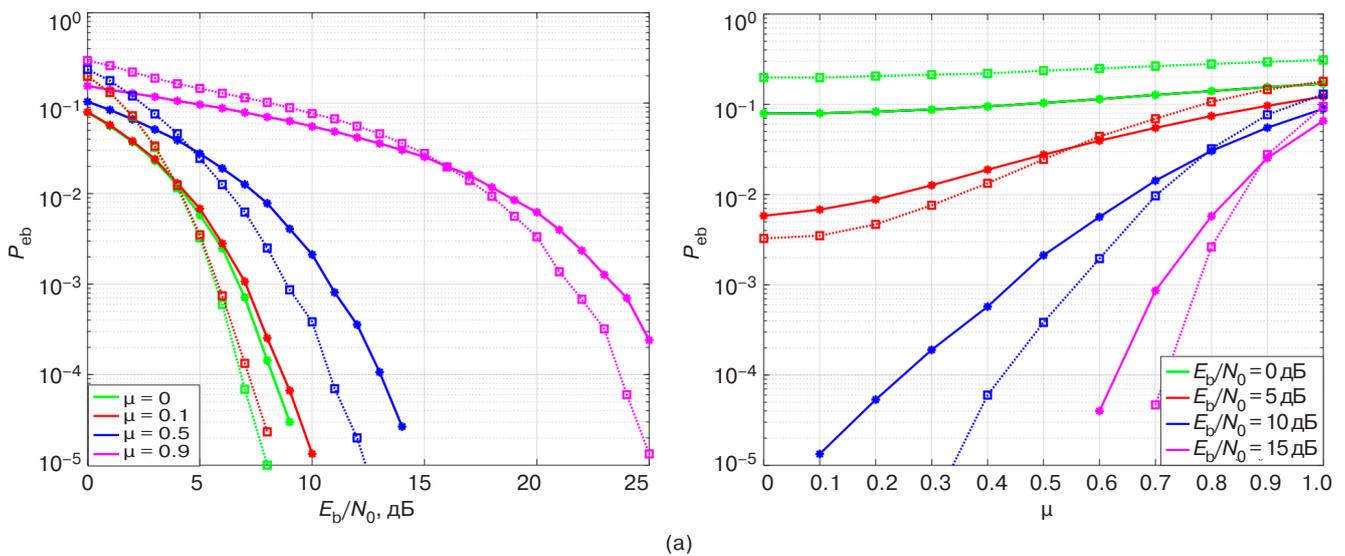


Рис. 10 (начало). Экспериментальные зависимости P_{eb} от E_b/N_0 (слева) и от μ (справа) при когерентном приеме сигналов М-ФМ при использовании сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби: (а) 2-ФМ;

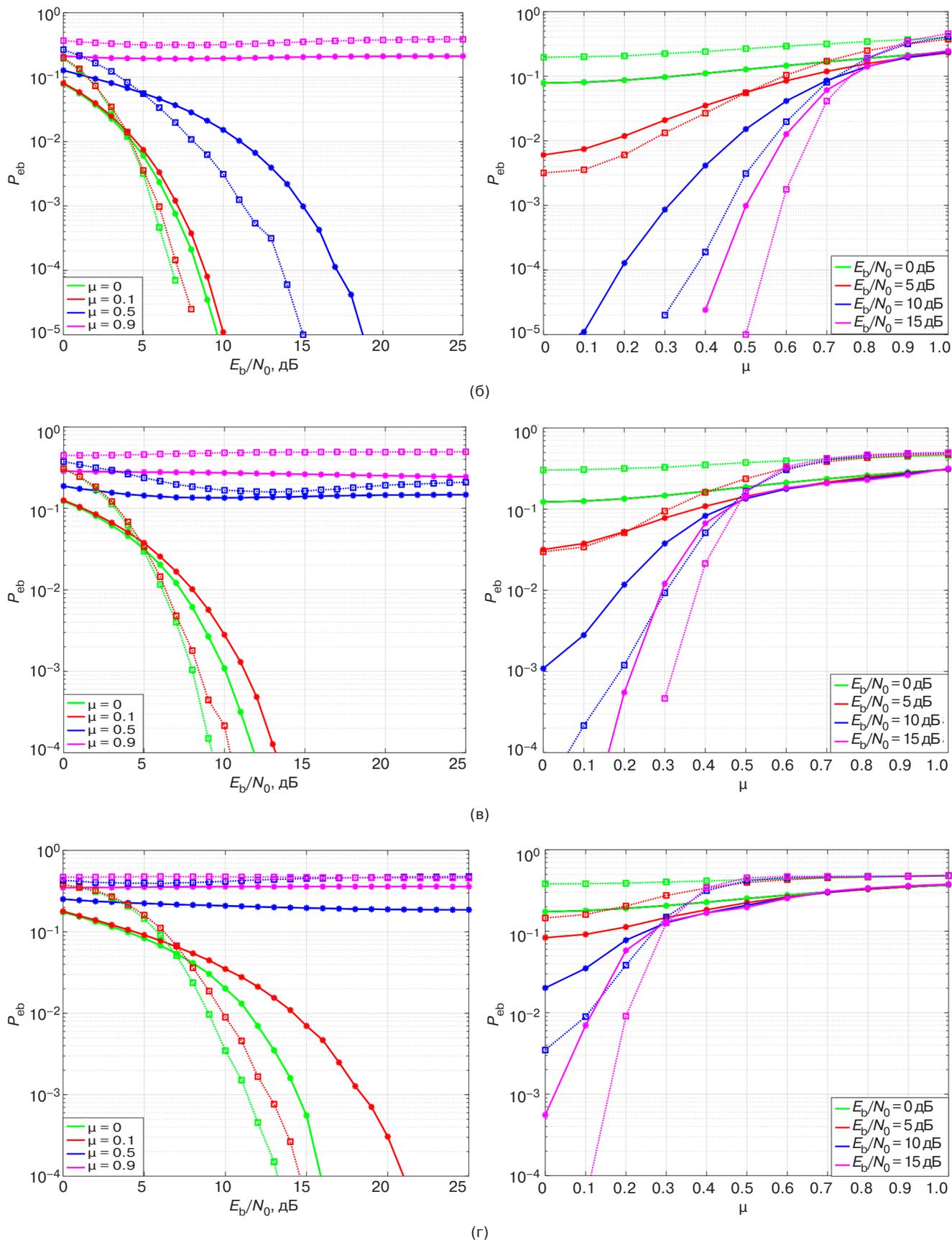


Рис. 10 (окончание). Экспериментальные зависимости P_{eb} от E_b/N_0 (слева) и от μ (справа) при когерентном приеме сигналов М-ФМ при использовании сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби: (б) 4-ФМ; (в) 8-ФМ; (г) 16-ФМ

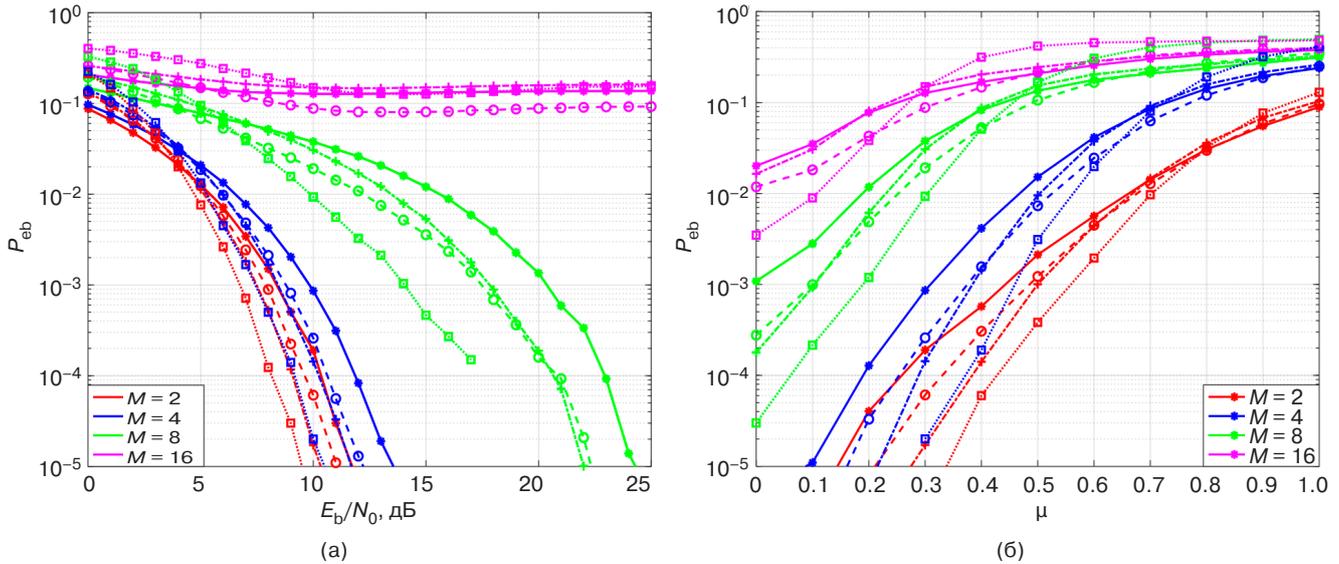


Рис. 11. Сравнительные зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 (а) и от относительной интенсивности гармонической помехи μ (б) при когерентном приеме сигналов М-ФМ для разных способов кодирования

На рис. 11 представлены сравнительные экспериментальные зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 ($\mu = 0.3$) и от интенсивности гармонической помехи ($E_b/N_0 = 10$ дБ) при когерентном приеме сигналов М-ФМ с использованием кода Хэмминга и сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби. Сплошные линии соответствуют вероятности битовой ошибки без применения кодов, штриховые линии – с применением кода Хэмминга (7,4), штрихпунктирные – с применением кода Хэмминга (15,11), а пунктирные линии – при применении сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби (7,5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено имитационное моделирование для оценки эффективности кодирования по коду Хэмминга и сверточного кодирования с алгоритмом декодирования Витерби при когерентном приеме сигналов М-ФМ на фоне шумовой и гармонической помех. По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. Имеется значительный выигрыш от применения корректирующих кодов в демодуляторах сигналов М-ФМ при наличии шумовой

и гармонической помех с малой интенсивностью. Например, при $\mu = 0.3$ и $P_{eb} = 10^{-4}$ для 4-ФМ с кодом Хэмминга (7,4) энергетический выигрыш составляет 1.24 дБ, с кодом Хэмминга (15,11) – 1.6 дБ, со сверточным кодированием и алгоритмом декодирования Витерби (7,5) – 2.69 дБ; при $\mu = 0.3$ и $P_{eb} = 10^{-3}$ для 8-ФМ с кодом Хэмминга (7,4) энергетический выигрыш составляет 2.89 дБ, с кодом Хэмминга (15,11) – 2.54 дБ, со сверточным кодированием и алгоритмом декодирования Витерби (7,5) – 5.4 дБ.

2. При увеличении позиционности сигналов М-ФМ и высокой интенсивности гармонической помехи применение сверточного кодирования и алгоритма декодирования Витерби ухудшает вероятность ошибки приема сигналов М-ФМ сильнее, чем коды Хэмминга.

3. Коды Хэмминга с более высокими скоростями кодирования превосходят коды с меньшей кодовой скоростью при большом отношении сигнал/шум. Например, при $E_b/N_0 \geq 14$ дБ, $\mu = 0.5$ и $P_{eb} = 10^{-4}$ для 4-ФМ с кодом Хэмминга (7,4) энергетический выигрыш составляет 1.4 дБ, с кодом Хэмминга (15,11) – 1.7 дБ; при $E_b/N_0 \geq 20.5$ дБ, $\mu = 0.3$ и $P_{eb} = 10^{-4}$ для 4-ФМ с кодом Хэмминга (7,4) энергетический выигрыш составляет 2 дБ, с кодом Хэмминга (15,11) – 2.3 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abu-Baker A., Bani-Hani K., Khasawneh F., Jaradat A. The Impact of Hamming Code and Cyclic Code on MPSK and MQAM Systems over AWGN Channel: Performance Analysis. *Univers. J. Electr. Electron. Eng.* 2021;8(1):9–15. <http://doi.org/10.13189/ujee.2021.080102>
2. Singh J., Bahel S. Comparative study of data transmission techniques of different block codes over AWGN channel using Simulink. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. 2014;9(12):609–615. <http://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V9P316>
3. Saraswat H., Sharma G., Mishra S.K. Performance evaluation and comparative analysis of various concatenated error correcting codes using BPSK modulation for AWGN channel. *International Journal of Electronics and Communication Engineering (IJECE)*. 2012;5(3):235–244. URL: https://www.ripublication.com/irph/ijece/ijecev5n3_01.pdf
4. Sarnin S.S., Kadri N., Mozi A.M., Ab Wahab N., Naim N.F. Performance analysis of BPSK and QPSK using errorcorrecting code through AWGN. In: *2010 International Conference on Networking and Information Technology*. IEEE; 2010. P. 178–182. <https://doi.org/10.1109/ICNIT.2010.5508536>
5. Pandey M., Pandey V.K. Comparative Performance Analysis of Block and Convolution Codes. *Int. J. Computer Appl.* 2015;119(24):43–47. <http://doi.org/10.5120/21388-4398>
6. Pushpa V., Ranganathan H., Palanivelan M. BER analysis of BPSK for block codes and convolution codes over AWGN channel. *Int. J. Pure Appl. Math.* 2017;114(11):221–230. URL: <https://acadpubl.eu/jsi/2017-114-7-ICPCIT-2017/articles/11/22.pdf>
7. Chopra S.R., Kaur J., Monga H. Comparative Performance Analysis of Block and Convolution Codes. *Indian J. Sci. Technol.* 2016;9(47):1–5. <http://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i47/106868>
8. El Maammar N., Bri S., Foshi J. Convolutional Codes BPSK Modulation with Viterbi Decoder. In: Noredidine G., Kacprzyk J. (Eds.). *International Conference on Information Technology and Communication System. ITCS 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer; 2018. V. 640. P. 267–278. http://doi.org/10.1007/978-3-319-64719-7_23
9. Wang J., Huang H., Liu J., Li J. Joint Demodulation and Error Correcting Codes Recognition Using Convolutional Neural Network. *IEEE Access*. 2022;10:104844–104851. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3201354>
10. Ar-Reyouchi E.M., Rattal S., Ghoumid K. A Survey on Error-Correcting Codes for Digital Video Broadcasting. *SN Comput. Sci.* 2022;3(2):105. <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00994-x>
11. Серченя А.А. Сравнительная оценка помехоустойчивого кодирования при использовании разных типов кодов. В сб.: *Инфокоммуникации: материалы 55-й юбилейной научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов*. Минск; 2019. С. 49–50. URL: https://libeloc.bsuir.by/bitstream/123456789/35911/1/Serchenya_Sravnitel'naya.pdf
12. Маглицкий Б.Н., Сергеева А.С. Оценка влияния искажений и помех на качественные показатели цифровых систем радиосвязи методом имитационного моделирования. Новосибирск: СибГУТИ; 2016. 129 с.
13. Елишев В.В., Тихонов Я.Е. Помехоустойчивость систем передачи информации с быстрой псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и кодированием в условиях шумовых помех. *Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио*. 2021;1(76):163–166. URL: <https://conf-ntores.etu.ru/assets/files/2021/cp/papers/163-166.pdf?ysclid=lvxmjy9dr243257656>
14. Голиков А.М. *Кодирование в телекоммуникационных системах*. Томск: ТУСУР; 2018. 319 с.
15. Куликов Г.В., Нгуен В.З., Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в присутствии гармонической помехи. *Научно-технические технологии*. 2018;19(11):32–38. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=vscalp&ysclid=lxidrb6ca649732959>
16. Куликов Г.В. Влияние гармонической помехи на помехоустойчивость корреляционного демодулятора сигналов МЧМ. *Радиотехника*. 2002;7:42–44.
17. Куликов Г.В., Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи. *Журнал радиоэлектроники*. 2018;11:2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.9>
18. Куликов Г.В., Усманов Р.Р., Трофимов Д.С. Анализ помехоустойчивости приема сигналов с многопозиционной амплитудно-фазовой манипуляцией в присутствии гармонической помехи. *Научно-технические технологии*. 2020;21(1):22–29. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=fdxmsn&ysclid=lxireoosth700939360>
19. Proakis J.G. *Digital communications*. 4th ed. New York: McGraw-Hill; 2001. 1002 p.
20. Sklar B. *Digital Communication: Fundamentals and Application*. 2nd ed. Prentice Hall; 2001. 1079 p.
21. Hillier C., Balyan V. Error Detection and Correction On-Board Nanosatellites Using Hamming Codes. *J. Electr. Comput. Eng.* 2019;6:1–15. <https://doi.org/10.1155/2019/3905094>

REFERENCES

1. Abu-Baker A., Bani-Hani K., Khasawneh F., Jaradat A. The Impact of Hamming Code and Cyclic Code on MPSK and MQAM Systems over AWGN Channel: Performance Analysis. *Univers. J. Electr. Electron. Eng.* 2021;8(1):9–15. <http://doi.org/10.13189/ujee.2021.080102>
2. Singh J., Bahel S. Comparative study of data transmission techniques of different block codes over AWGN channel using Simulink. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. 2014;9(12):609–615. <http://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V9P316>

3. Saraswat H., Sharma G., Mishra S.K. Performance evaluation and comparative analysis of various concatenated error correcting codes using BPSK modulation for AWGN channel. *International Journal of Electronics and Communication Engineering (IJECE)*. 2012;5(3):235–244. Available from URL: https://www.ripublication.com/irph/ijece/ijecev5n3_01.pdf
4. Sarnin S.S., Kadri N., Mozi A.M., Ab Wahab N., Naim N.F. Performance analysis of BPSK and QPSK using errorcorrecting code through AWGN. In: *2010 International Conference on Networking and Information Technology*. IEEE; 2010. P. 178–182. <https://doi.org/10.1109/ICNIT.2010.5508536>
5. Pandey M., Pandey V.K. Comparative Performance Analysis of Block and Convolution Codes. *Int. J. Computer Appl.* 2015;119(24):43–47. <http://doi.org/10.5120/21388-4398>
6. Pushpa V., Ranganathan H., Palanivelan M. BER analysis of BPSK for block codes and convolution codes over AWGN channel. *Int. J. Pure Appl. Math.* 2017;114(11):221–230. Available from URL: <https://acadpubl.eu/jsi/2017-114-7-ICPCIT-2017/articles/11/22.pdf>
7. Chopra S.R., Kaur J., Monga H. Comparative Performance Analysis of Block and Convolution Codes. *Indian J. Sci. Technol.* 2016;9(47):1–5. <http://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i47/106868>
8. El Maammar N., Bri S., Foshi J. Convolutional Codes BPSK Modulation with Viterbi Decoder. In: Noreddine G., Kacprzyk J. (Eds.). *International Conference on Information Technology and Communication System. ITCS 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer; 2018. V. 640. P. 267–278. http://doi.org/10.1007/978-3-319-64719-7_23
9. Wang J., Huang H., Liu J., Li J. Joint Demodulation and Error Correcting Codes Recognition Using Convolutional Neural Network. *IEEE Access*. 2022;10:104844–104851. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3201354>
10. Ar-Reyouchi E.M., Rattal S., Ghomid K. A Survey on Error-Correcting Codes for Digital Video Broadcasting. *SN Comput. Sci.* 2022;3(2):105. <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00994-x>
11. Serchenya A.A. Comparative assessment of noise-resistant coding using different types of codes. In: *Infocommunications: Materials of the 55th Anniversary Scientific Conference of Graduate Students, Undergraduates and Students*. Minsk; 2019. P. 49–50 (in Russ.). Available from URL: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/359111/Serchenya_Sravnitelnaya.pdf
12. Maglitskii B.N., Sergeeva A.S. *Otsenka vliyaniya iskazhenii i pomekh na kachestvennye pokazateli tsifrovyykh sistem radiosvyazi metodom imitatsionnogo modelirovaniya (Assessment of the Influence of Distortions and Interference on the Quality Indicators of Digital Radio Communication Systems using Simulation Modeling)*. Novosibirsk: SibGUTI; 2016. 129 p. (in Russ.).
13. Elishev V.V., Tikhonov Ya.E. Noise immunity of information transmission systems with fast pseudo-random tuning of the operating frequency and coding in noise interference conditions. *Scientific and Technical Conference of the A.S. Popov St. Petersburg NTO RES devoted to Radio Day*. 2021;1(76):163–166 (in Russ.). Available from URL: <https://conf-ntores.etu.ru/assets/files/2021/cp/papers/163-166.pdf?ysclid=lvxmjy9dr243257656>
14. Golikov A.M. *Kodirovanie v telekommunikatsionnykh sistemakh (Coding in Telecommunication Systems)*. Tomsk: TUSUR; 2018. 319 p. (in Russ.).
15. Kulikov G.V., Nguyen V.D., Nesterov A.V., Lelyukh A.A. Noise immunity of reception of signals with multiple phase shift keying in the presence of harmonic interference. *Naukoemkie tekhnologii = Science Intensive Technologies*. 2018;19(11): 32–38 (in Russ.). Available from URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=vscalp&ysclid=lxidr6ica649732959>
16. Kulikov G.V. The effect of harmonic interference on the noise immunity of the correlating demodulator of the MSK signals. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2002;7:42–44 (in Russ.).
17. Kulikov G.V., Nesterov A.V., Lelyukh A.A. Interference immunity of reception of signals with quadrature amplitude shift keying in the presence of harmonic interference. *Zhurnal Radioelektroniki = J. Radio Electronics*. 2018;11:2 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.9>
18. Kulikov G.V., Usmanov R.R., Trofimov D.S. Noise immunity analysis of amplitude and phase-shift keying signals reception in presence of harmonic interference. *Naukoemkie tekhnologii = Science Intensive Technologies*. 2020;21(1):22–29 (in Russ.). Available from URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=fdxmsn&ysclid=lxireoosth700939360>
19. Proakis J.G. *Digital communications*. 4th ed. New York: McGraw-Hill; 2001. 1002 p.
20. Sklar B. *Digital Communication: Fundamentals and Application*. 2nd ed. Prentice Hall; 2001. 1079 p.
21. Hillier C., Balyan V. Error Detection and Correction On-Board Nanosatellites Using Hamming Codes. *J. Electr. Comput. Eng.* 2019;6:1–15. <https://doi.org/10.1155/2019/3905094>

Об авторе

Нгуен Ван Зунг, к.т.н., преподаватель, кафедра теории цепей – измерения, Факультет радиотехники и электроники, Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона (Вьетнам, Ханой, ул. Хоанг Куок Вьет, д. 236). E-mail: nguyenvandungvtdt@lqdtu.edu.vn. <https://orcid.org/0000-0002-2810-1204>

About the author

Van D. Nguyen, Cand. Sci. (Eng.), Lecturer, Department of Circuit Theory – Measurement, Faculty of Radio-Electronic Engineering, Le Quy Don Technical University (236, Hoang Quoc Viet, Ha Noi, Vietnam). E-mail: nguyenvandungvtdt@lqdtu.edu.vn. <https://orcid.org/0000-0002-2810-1204>

УДК 535.343.2
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-96-105>
EDN ZZDBRB



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Конфигурация Кречмана как метод увеличения оптического поглощения в двумерных графеноподобных полупроводниках

А.А. Гуськов [@],
Н.В. Безвиконный,
С.Д. Лавров

МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[@] Автор для переписки, e-mail: guskov@mirea.ru

Резюме

Цели. Оптические свойства двумерных полупроводниковых материалов, в частности монослойных дихалькогенидов переходных металлов, предоставляют новые возможности в области нано- и оптоэлектроники. Однако практическое применение этих материалов ограничено из-за низкой способности поглощать свет, вызванной их высокой прозрачностью. При работе с такими тонкими структурами возникает возможность использования множества физических механизмов, включая резонансные и плазмонные эффекты, которые можно настроить для улучшения эффективности поглощения света. Цель данной работы – оптимизация поглощения света в двумерном полупроводнике в конфигурации Кречмана с учетом указанных выше явлений для последующего применения в устройствах оптоэлектроники.

Методы. Для проведения моделирования использован метод конечных элементов решения уравнений Максвелла в структуре, представляющей стандартную конфигурацию Кречмана. Проведен параметрический анализ влияния трех параметров: угла падения света, толщины металлического слоя и толщины полупроводникового слоя.

Результаты. Проведено исследование конфигурации модели Кречмана с целью достижения максимального оптического поглощения в двумерной полупроводниковой пленке. Определены параметры, при которых наблюдается наибольшая «площадь» пика поглощения, включая толщину металлического слоя и угол падения излучения. На основе полученных результатов выявлены лучшие параметры для достижения наивысшей степени поглощения в двумерной пленке полупроводника.

Выводы. На основе численных исследований конфигурации модели Кречмана обнаружено, что оптимальными параметрами для максимального поглощения в монослойной пленке являются: толщина слоя серебра, не превышающая 20 нм, и угол падения света от 55° до 85°. Установлено, что максимальное поглощение в двумерной пленке составляет лишь часть от общего поглощения всей структуры. Таким образом, для достижения максимальной эффективности в определенных оптоэлектронных приложениях необходим индивидуальный подход к выбору параметров.

Ключевые слова: двумерные полупроводники, дихалькогениды переходных металлов, поверхностный плазмонный резонанс, плазмонные эффекты, наноструктурированные металлические пленки

• Поступила: 26.09.2023 • Доработана: 18.01.2024 • Принята к опубликованию: 22.05.2024

Для цитирования: Гуськов А.А., Безвиконный Н.В., Лавров С.Д. Конфигурация Кречмана как метод увеличения оптического поглощения в двумерных графеноподобных полупроводниках. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):96–105. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-96-105>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Kretschmann configuration as a method to enhance optical absorption in two-dimensional graphene-like semiconductors

Andrey A. Guskov[@],
Nikita V. Bezzikonnyi,
Sergey D. Lavrov

MIREA — Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
[@] Corresponding author, e-mail: guskov@mirea.ru

Abstract

Objectives. The optical properties of two-dimensional semiconductor materials, specifically monolayered transition metal dichalcogenides, present new horizons in the field of nano- and optoelectronics. However, their practical application is hindered by the issue of low light absorption. When working with such thin structures, it is essential to consider numerous complex factors, such as resonance and plasmonic effects which can influence absorption efficiency. The aim of this study is the optimization of light absorption in a two-dimensional semiconductor in the Kretschmann configuration for future use in optoelectronic devices, considering the aforementioned phenomena.

Methods. A numerical modeling method was applied using the finite element method for solving Maxwell's equations. A parametric analysis was conducted focusing on three parameters: angle of light incidence, metallic layer thickness, and semiconductor layer thickness.

Results. Parameters were identified at which the maximum area of absorption peak was observed, including the metallic layer thickness and angle of light incidence. Based on the resulting graphs, optimal parameters were determined, in order to achieve the highest absorption percentages in the two-dimensional semiconductor film.

Conclusions. Based on numerical studies, it can be asserted that the optimal parameters for maximum absorption in the monolayer film are: Ag thickness <20 nm and angle of light incidence between 55° and 85°. The maximum absorption in the two-dimensional film was found only to account for a portion of the total absorption of the entire structure. Thus, a customized approach to parameter selection is necessary, in order to achieve maximum efficiency in certain optoelectronic applications.

Keywords: two-dimensional semiconductors, transition metal dichalcogenides, surface plasmon resonance, plasmon effects, nanostructured metal films

• Submitted: 26.09.2023 • Revised: 18.01.2024 • Accepted: 22.05.2024

For citation: Guskov A.A., Bezvikonnyi N.V., Lavrov S.D. Kretschmann configuration as a method to enhance optical absorption in two-dimensional graphene-like semiconductors. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):96–105. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-96-105>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на уникальные свойства двумерных полупроводниковых материалов, их интеграция в устройства нано- и оптоэлектроники все еще остается значительной проблемой. Так, например, монослойные дихалькогениды переходных металлов (ДПМ), такие как MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , WSe_2 и другие, хотя и обладают потенциалом для применения в оптических детекторах и фотовольтаических элементах, имеют существенный недостаток, который и проистекает из их двумерности – высокая оптическая прозрачность. В [1] продемонстрировано, что двумерная пленка MoS_2 поглощает не более 10% падающего света в видимом оптическом диапазоне, что недостаточно для создания на его основе эффективных фоточувствительных элементов. Однако наиболее очевидное решение данной проблемы, заключающееся в увеличении собственной толщины полупроводника, не может быть реализовано из-за почти мгновенного перехода из прямозонного в непрямозонный полупроводник, что ведет к последующей потере его эффективности в качестве светочувствительного элемента.

На сегодняшний день существует множество способов решения указанной проблемы. Их условно можно разделить на две основные группы. Первая группа использует интерференционные эффекты, возникающие при применении резонатора Фабри – Перо [2–4], тогда как вторая группа опирается на использование локальных или поверхностных плазмонных резонансов [5–10].

Так, в работе [3] показано, что поглощение света в двумерной пленке MoS_2 может достигать 70%, а в пленке WSe_2 – 75% благодаря включению в резонатор слоя гексагонального нитрида бора. Работа [11] демонстрирует двукратное теоретическое и шестикратное экспериментальное увеличение поглощения двумерной пленки MoS_2 почти во всем видимом спектре при изменении структуры с $\text{MoS}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ на $\text{MoS}_2/\text{SiO}_2/\text{Au}/\text{Si}$ за счет возникновения интерференции за счет многократных отражений от интерфейсов воздух/ SiO_2 и SiO_2/Au .

Несмотря на необходимость применения значительно более сложных технологических методов и подходов для использования плазмонных эффектов, они зачастую оказываются более эффективными. Например,

с использованием наночастиц или плазмонных антенн происходит резонансное усиление электромагнитного поля на границе раздела металл/полупроводник, что позволяет концентрировать свет непосредственно в двумерные структуры [5]. За последние несколько лет предпринимались неоднократные попытки усилить сигнал фотолюминесценции в монослоях ДПМ (например, таких как MoS_2 , WS_2 и WSe_2) путем нанесения на поверхность ДПМ одиночных металлических наночастиц или их массивов [6, 7]. Благодаря своей относительной простоте по сравнению с остальными технологическими методами создания плазмонных структур, этот метод может быть использован для разработки фоточувствительных устройств [12, 13].

Много экспериментальных и теоретических работ посвящено упорядоченным плазмонным структурам, нанесенным на двумерные полупроводники [8–10]. Одним из их ключевых преимуществ является возможность корректировки рабочих характеристик оптических устройств путем модификации формы и геометрии плазмонных элементов [14, 15].

Стоит также отметить возможность комбинации плазмонных и интерференционных методик, что подтверждается результатами, опубликованными в работе [16]. Было получено поглощение 40% в монослое MoS_2 в видимом диапазоне при использовании комбинации интерференционного диэлектрического покрытия и наноразмерных бороздок. Также в работе [17] показан метод создания упорядоченных серебряных плазмонных структур на поверхности волновода. Было продемонстрировано почти 95%-е суммарное поглощение во всей структуре (и 70%-е поглощение в монослое MoS_2 , в частности) за счет использования геометрии, которая комбинирует интерференционные и плазмонные эффекты.

Все вышеупомянутые методы основаны на эффекте локального плазмонного резонанса, который подразумевает поглощение в металлических плазмонных наноструктурах, что не является оптимальным. Поверхностный плазмонный резонанс при определенных условиях может быть лишен этих недостатков. К настоящему времени представлено несколько работ, в которых показаны преимущества использования поверхностного плазмонного резонанса в геометрии Кречмана [18, 19]. В работе [20] высокое поглощение в ДПМ (достигающее почти 100%) было

получено при нанесении двумерной пленки ДПМ непосредственно на поверхности диэлектрика. Вдоль интерфейса полупроводник/диэлектрик идет распространение стоячей плазмонной волны, за счет чего и происходят локализация падающего излучения в ДПМ и увеличение его общего поглощения. Стоит обратить внимание, что в этой работе высокое поглощение достигнуто не в самой двумерной пленке ДПМ, а именно во всей структуре, включая периодическую полосковую плазмонную решетку из золота.

Однако к настоящему времени использование геометрии Кречмана для увеличения оптического поглощения в ДПМ все еще не отработано до прикладного уровня. Несмотря на то, что она принципиально технологически проще, чем создание плазмонных структур литографическими методами, для ее успешного применения требуется больше теоретических исследований, которые нужны для оптимизации ее использования в комбинации с двумерными пленками полупроводников. При этом важным является сам физический механизм детектирования оптического излучения в описанных выше структурах. В них наибольший вклад в фототок вносят фотовольтаический эффект и эффект фотопроводимости [21–23], которые возникают в самом наноразмерном слое ДПМ. Таким образом для создаваемых фоточувствительных элементов главную роль играет не общее поглощение в создаваемых многослойных структурах, а именно поглощение в самом ДПМ, которое, очевидно, уже может быть значительно ниже. Данная работа посвящена теоретическому моделированию применения геометрии Кречмана для оценки возможности увеличения поглощения в двумерном полупроводниковом слое, а не во всей структуре, что особенно актуально для приложений фотовольтаики.

МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ

Моделируемая структура состояла из стеклянной призмы с показателем преломления приблизительно равным 1.5 [24, 25], на которую был нанесен тонкий металлический слой и двумерная пленка ДПМ (рис. 1). В конфигурации Кречмана обычно используются такие металлы, как золото [26, 27], медь [28, 29], алюминий [30] или платина [31]. Для генерации плазмонных волн наибольшей интенсивности необходимо выбрать материал с наибольшим по модулю значением ϵ' (действительная часть диэлектрической проницаемости) и малым значением ϵ'' (мнимая часть диэлектрической проницаемости) в выбранном видимом оптическом диапазоне [30]. В данном случае серебро является оптимальным выбором. Следует отметить, что медь и золото демонстрируют чуть меньшую эффективность в выбранном диапазоне длин волн. Однако применение золота

коммерчески нецелесообразно, в то время как поверхность меди может быть покрыта поглощающим оксидным слоем, что существенно уменьшает эффективность поверхностных плазмонов [32]. Именно поэтому в данной работе в качестве металла использовалось серебро, оптические константы которого были взяты из [33]. В качестве полупроводниковой пленки был использован WSe_2 , т.к. это один из наиболее изученных двумерных полупроводников, а его оптические константы хорошо известны как для монослойного образца, так и для многослойных [34]. Данный подход можно применить для любого типа ДПМ с известными оптическими константами.

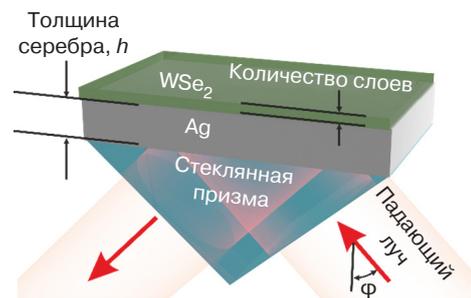


Рис. 1. Принципиальная схема исследуемой структуры

Моделирование распространения оптического излучения в рассматриваемой структуре проводилось при использовании программного пакета *COMSOL Multiphysics*¹ в модуле расширения «Волновая оптика». В исследуемой конфигурации есть несколько ключевых параметров, которые вносят наибольший вклад в результаты моделирования. Такие параметры как толщина серебра и количество слоев ДПМ обладают технологическими ограничениями и могут быть выбраны в широком диапазоне толщин. Также варьируемым параметром является угол падения оптического излучения на границу раздела металл/диэлектрик. При этом важным для геометрии Кречмана является использование именно поперечной магнитной моды (transverse magnetic mode) падающего излучения, т.к. именно она является необходимым условием для генерации поверхностных плазмонных волн. Длина волны падающего оптического излучения равнялась 740 нм, что соответствует положению экситонного пика для WSe_2 . Варьирование этих параметров дает возможность менять распределение электрического и магнитного полей в структуре, что позволяет определить параметры для наибольшей возможной плотности мощности оптического электромагнитного излучения в области двумерной пленки полупроводника.

¹ <https://www.comsol.com/>. Дата обращения 01.06.2023. / Accessed June 01, 2023.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены графики зависимости максимального значения поглощения от количества слоев полупроводниковой пленки, угла падения света и толщины серебряного слоя. Под этим значением в данном случае подразумевается максимальное значение среди всех других варьируемых параметров.

На рис. 2а в координатах угла падения и количества слоев показаны максимальные значения для всех прочих параметров (в данном случае это толщина серебряного слоя). То есть, среди наборов графиков в координатах угла падения и количества слоев ДПМ были взяты максимальные значения поглощения для всех значений толщины серебряного слоя. Если взять точку с максимальным значением поглощения 99% (по координатам количества слоев ДПМ 40 и угла падения 80°), то по любому другому графику (рис. 2б и в) можно определить значение третьей координаты – толщины слоя серебра, при которой это максимальное значение достигается. Так из рис. 2б, в видно, что это значение толщины слоя серебра составляет ≈ 8 нм.

Из рис. 2а, б видно, что в такой конфигурации модели Кречмана максимального значения поглощения в ДПМ (близкого к 100%) удается достичь только при большом количестве слоев полупроводника (от 15 и более). Тем не менее, это показывает, что достижение такого большого процента поглощения возможно именно в полупроводниковом слое (который может являться проводящим каналом для устройств оптоэлектроники), а не во всей структуре (как, например, было показано в работах, проанализированных во введении настоящей статьи).

Помимо максимального значения оптического поглощения характерной величиной является «площадь» пика поглощения. Эту величину необходимо учитывать, поскольку, например, при разных углах падения луча максимальные значения оптического

поглощения могут быть одинаковы, однако «площади» этих пиков поглощения могут кардинальным образом отличаться друг от друга. Этот факт может быть определяющим при выборе конфигурации для соответствующих приложений. Поэтому также был рассчитан график зависимости величины «площади» пика поглощения от количества слоев полупроводниковой пленки, угла падения света и толщины серебряного слоя. Результаты данного расчета приведены на рис. 3. Под «площадью» пиков в данном случае понимается количество точек, значение которых выше 68% (2σ , где σ – среднее квадратическое отклонение), от максимума поглощения. Данный анализ также необходим, потому что если пик поглощения очень узкий по каким-либо координатам, то технологически создать структуру с такими точными допусками довольно сложно. Именно поэтому важно определение не только максимального значения поглощения, но и его «площади».

Рис. 3в демонстрирует конкретные параметры, при которых достижима большая «площадь» пиков поглощения. Так, например, видно, что большая «площадь» пика поглощения достигается при толщине слоя серебра до 5 нм и угле падения от 42° до 60° (из рис. 2в видно, что этот пик примерно соответствует значению поглощения 50%).

На рис. 4 приведен график зависимости поглощения в ДПМ от толщины серебряного слоя и угла падения света. На вставке пунктирной белой линией выделена область с максимальным значением поглощения. Можно сделать вывод, что использование монослойного ДПМ не очень выгодно с точки зрения достижения высокого оптического поглощения (рис. 4 демонстрирует максимально достижимое значение поглощения в 40%). Однако для устройств наноэлектроники и в других приложениях необходимо использование энергоэффективных полупроводников, к которым относятся именно монослойные ДПМ,

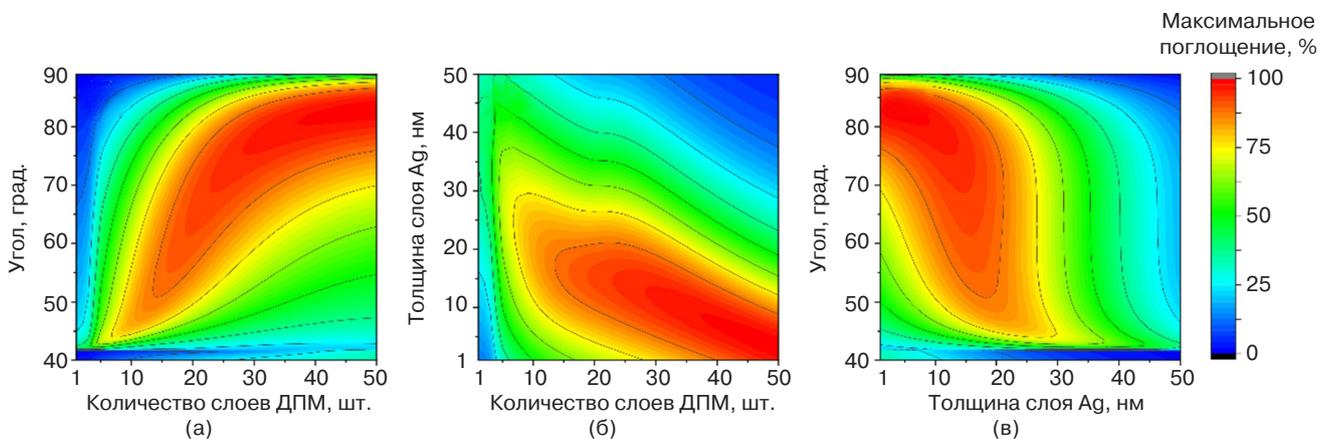


Рис. 2. Графики зависимости максимального значения поглощения в WSe_2 в конфигурации с однородным слоем серебра в зависимости от: (а) угла падения излучения и количества слоев ДПМ, (б) толщины слоя Ag и количества слоев ДПМ, (в) угла падения излучения и толщины слоя Ag

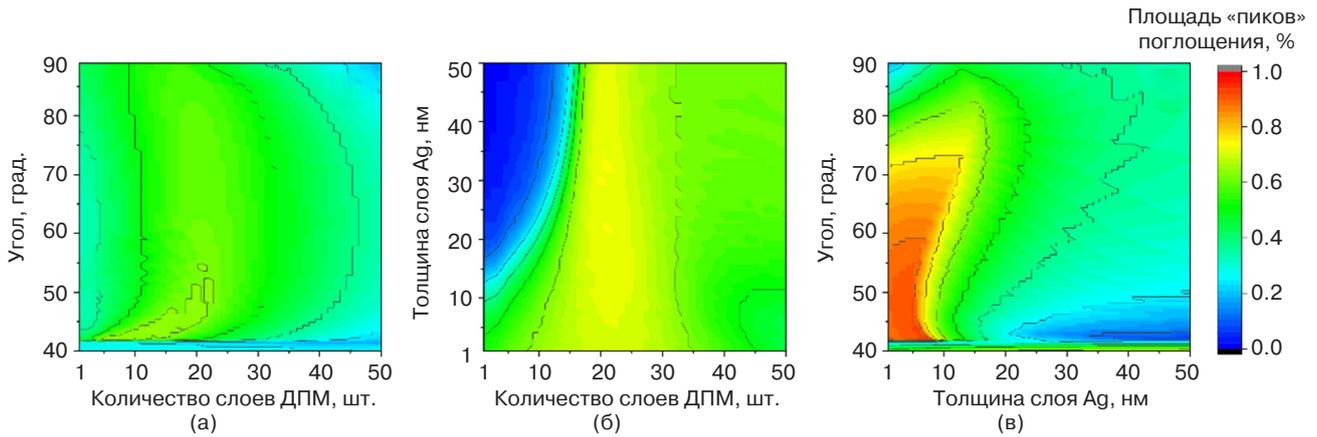


Рис. 3. Графики зависимости величины «площади» пиков поглощения в WSe_2 в конфигурации с ровным слоем серебра в зависимости от: (а) угла падения излучения и количества слоев ДПМ, (б) толщины слоя Ag и количества слоев ДПМ, (в) угла падения падающего излучения и толщины слоя Ag

за счет своей прямой запрещенной зоны. Также это может быть выгодно с точки зрения интеграции и миниатюризации устройств. Отсюда очевиден интерес к поиску методов увеличения поглощения именно в однослойной пленке. Из рис. 4 хорошо видно, что оптимальными значениями параметров для достижения максимального поглощения в монослойной пленке являются: толщина серебряного слоя 37 нм и угол падения падающего излучения 42.1° .

Выше было указано, что важной исследуемой величиной является поглощение именно полупроводниковым слоем. На рис. 5 сплошными линиями показаны графики поглощения, отражения и пропускания всей структуры в зависимости от угла

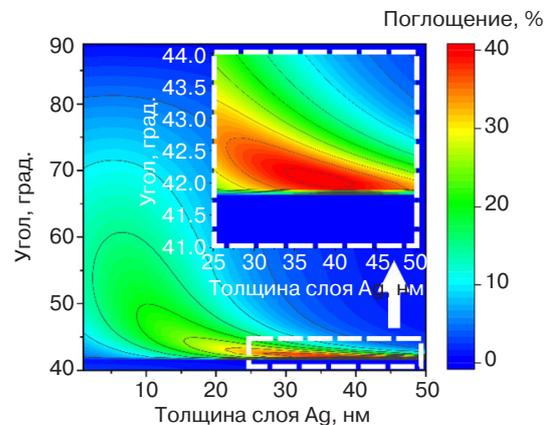


Рис. 4. График зависимости поглощения в ДПМ от толщины серебряного слоя и угла падения света

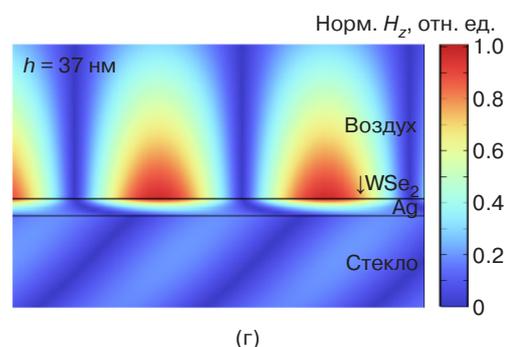
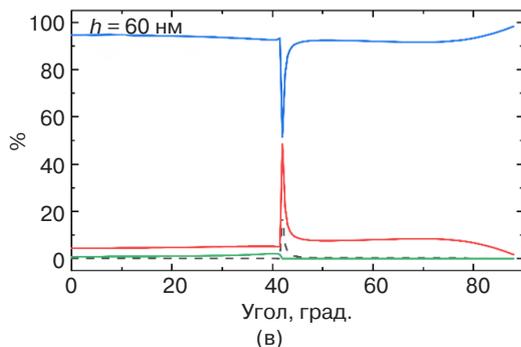
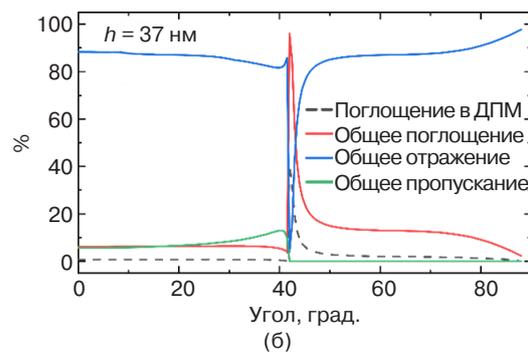
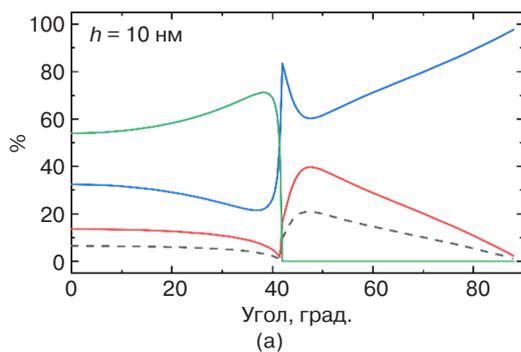


Рис. 5. Графики поглощения, отражения и пропускания в зависимости от угла падения света для структур с толщиной серебряного слоя 10 (а), 37 (б) и 60 (в) нм и нормированный график (г) распределения магнитного поля (H_z -компонента)

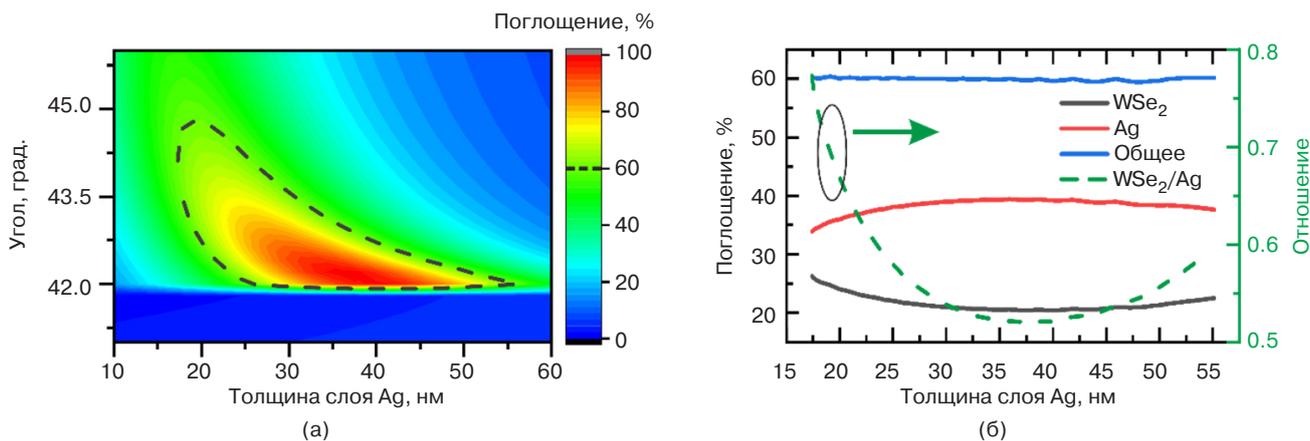


Рис. 6. Карта оптического поглощения во всей структуре в зависимости от толщины серебряного слоя и угла падения луча (а) рассчитанные значения поглощения в пленке WSe₂ и Ag по отдельности в зависимости от толщины слоя Ag (б)

падения света для разных толщин серебряного слоя, а пунктирным – графики поглощения именно полупроводникового слоя. Это типовые графики, которые возникают при использовании геометрии Кречмана [35].

Ширина пиков поглощения свидетельствует об увеличении поглощения именно за счет плазмонного резонанса. На рис. 5г показан график распределения магнитного поля (H_z -компонента) в структуре с толщиной серебра 37 нм и угле падения света 41.2°, т.е. в пике плазмонного резонанса и поглощения на рис. 4. Здесь можно увидеть стоячие волны, вид которых характерен именно для поверхностного плазмонного резонанса. Также можно заметить, что в данном случае поглощение в пленке полупроводника составляет всего половину от общего поглощения структуры.

На рис. 6а представлена карта поглощения всей структуры в зависимости от толщины серебряного слоя и угла падения (толщина WSe₂ – один монослой). В качестве примера был выбран контур графика с уровнем поглощения 60% (черный пунктирный контур). Из графика видно, что общего поглощения, равного или превышающего 60%, можно достичь при использовании различных комбинаций толщины металла и угла падения. Однако это не означает, что поглощение в ДПМ будет максимальным. Для демонстрации этого эффекта далее вдоль белой линии со стрелками был проведен расчет поглощения в монослойной пленке, серебре, и рассчитано отношение этих поглощений (черная, красная и пунктирная зеленая линии на рис. 6б). Хорошо видно, что на всем графике поглощение всей структуры составляет 60%, однако графики поглощения отдельных слоев структуры не являются постоянными. Пунктирный зеленый график показывает, что отношение поглощения в полупроводнике к поглощению в металле может варьироваться от 0.7 до 0.5, т.е. отличаться почти в 1.5 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы выполнено теоретическое исследование оптического поглощения в полупроводниковой пленке WSe₂ в структуре с конфигурацией Кречмана с учетом таких параметров как толщина WSe₂, толщина серебряного слоя и угол падения света. При длине волны экситонного пика (740 нм) высокий уровень поглощения (более 80%) достигается при толщине WSe₂ от 8 нм и выше (что соответствует 15 монослойным слоям). В этом случае толщина серебряного слоя должна составлять до 20 нм, а угол падения должен находиться в диапазоне от 50° до 85°. Для достижения 100%-го поглощения необходима толщина WSe₂ порядка 22 нм и более (что соответствует 40 слоям), значение толщины слоя Ag должно быть меньше 10 нм, а угол падения – в диапазоне от 55° до 85°.

При этом максимально достижимая «площадь» пика поглощения наблюдается при толщине серебряного слоя до 5 нм и угле падения – между 42° и 60°. Для монослойной пленки оптимальные показатели поглощения достигаются при толщине серебряного слоя 37 нм и угле падения 42.1°. При таких условиях общее поглощение в структуре составляет 100%, тогда как поглощение в монослойной пленке составляет 40%.

Следует подчеркнуть важность определения оптимальных параметров для поглощения непосредственно в полупроводниковой пленке. Несмотря на одинаковые показатели поглощения во всей структуре, соотношение поглощений между полупроводниковым слоем WSe₂ и металлическим слоем Ag может варьироваться в диапазоне от 0.7 до 0.5. Эта информация имеет ключевое значение для разработки устройств нано- и оптоэлектроники, таких как фототранзисторы и фотодетекторы с двумерным полупроводниковым каналом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Основные полученные результаты были выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № FSFZ-2023-0005). Авторы благодарят за поддержку РТУ МИРЭА (грант «Для молодых ученых» НИЧ-55 «Поляризационно-чувствительные оптические детекторы на основе двумерных полупроводников») и Фонд содействия инновациям по программе «УМНИК» по договору № 18383ГУ/2023 от 09.08.2023 г.

ACKNOWLEDGMENTS

The main results obtained were supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment No. FSFZ-2023-0005). The authors thank RTU MIREA for the support (grant “For Young Scientists” NICH-55 “Polarization-sensitive optical detectors based on two-dimensional semiconductors”) and the Foundation for Promotion of Innovations under the UMNIC program (contract No. 18383GU/2023 dated 09.08.2023).

Вклад авторов

А.А. Гуськов – теоретическое моделирование, проведение численных расчетов с использованием метода конечных элементов для решения уравнений Максвелла, написание текста статьи.

Н.В. Безвиконный – визуализация и систематизация результатов, создание графиков и диаграмм, иллюстрирующих ключевые параметры и зависимость эффективности поглощения света от различных факторов.

С.Д. Лавров – общее руководство работой, формулирование исследовательской задачи, стратегическое направление проекта, обеспечение достижения поставленных целей и высокого качества итоговых результатов.

Authors' contributions

A.A. Guskov – theoretical modeling, conducting numerical calculations using the finite element method to solve Maxwell's equations, and writing the text of the article.

N.V. Bezikonnyi – visualization and systematization of results, creating graphs and diagrams illustrating key parameters and the dependence of light absorption efficiency on various factors.

S.D. Lavrov – overall project supervision, formulation of the research problem, strategic direction of the project, ensuring the achievement of set goals and high quality of the results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Liu J.-T., Wang T.-B., Li X.-J., Liu N.-H. Enhanced Absorption of Monolayer MoS₂ with Resonant Back Reflector. *J. Appl. Phys.* 2014;115:193511. <https://doi.org/10.1063/1.4878700>
- Jeong H.Y., Kim U.J., Kim H., et al. Optical Gain in MoS₂ via Coupling with Nanostructured Substrate: Fabry–Perot Interference and Plasmonic Excitation. *ACS Nano.* 2016;10(9):8192–8198. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.6b03237>
- Huang X., Feng X., Chen L., Wang L., Tan W.C., Huang L., Ang K.-W. Fabry-Perot Cavity Enhanced Light-Matter Interactions in Two-Dimensional van Der Waals Heterostructure. *Nano Energy.* 2019;62:667–673. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.05.090>
- Kumari S., Dalal J., Kumar V., Kumar A., Ohlan A. Emerging Two-Dimensional Materials for Electromagnetic Interference Shielding Application. *Int. J. Mol. Sci.* 2023;24(15):12267. <https://doi.org/10.3390/ijms241512267>
- Gorbatova A.V., Khusyainov D.I., Yachmenev A.E., Khabibullin R.A., Ponomarev D.S., Buryakov A.M., Mishina E.D. A Photoconductive THz Detector Based on a Superlattice Heterostructure with Plasmonic Amplification. *Tech. Phys. Lett.* 2020;46(11):1111–1115. <https://doi.org/10.1134/S1063785020110218>
- Yu L., Liu D., Qi X.-Z., Xiong X., Feng L.-T., Li M., Guo G.-P., Guo G.-C., Ren X.-F. Gap Plasmon-Enhanced Photoluminescence of Monolayer MoS₂ in Hybrid Nanostructure. *Chinese Phys. B.* 2018;27(4):047302. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/27/4/047302>
- Johnson A.D., Cheng F., Tsai Y., Shih C.K. Giant Enhancement of Defect-Bound Exciton Luminescence and Suppression of Band-Edge Luminescence in Monolayer WSe₂-Ag Plasmonic Hybrid Structures. *Nano Lett.* 2017;17(7):4317–4322. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b01364>
- Butun S., Tongay S., Aydin K. Enhanced Light Emission from Large-Area Monolayer MoS₂ Using Plasmonic Nanodisc Arrays. *Nano Lett.* 2015;15(4):2700–2704. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b00407>
- Su H., Wu S., Yang Y., Leng Q., Huang L., Fu J., Wang Q., Liu H., Zhou L. Surface Plasmon Polariton-Enhanced Photoluminescence of Monolayer MoS₂ on Suspended Periodic Metallic Structures. *Nanophotonics.* 2020;10(2):975. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0545>
- Miao J., Hu W., Jing Y., Luo W., Liao L., Pan A., Wu S., Cheng J., Chen X., Lu W. Surface Plasmon-Enhanced Photodetection in Few Layer MoS₂ Phototransistors with Au Nanostructure Arrays. *Small.* 2015;11(20):2392–2398. <https://doi.org/10.1002/sml.201403422>
- Xu H. Enhanced Light–Matter Interaction of a MoS₂ Monolayer with a Gold Mirror Layer. *RSC Adv.* 2017;7(37):23109–23113. <https://doi.org/10.1039/C6RA27691A>

12. Guo J., Li S., He Z., et al. Near-Infrared Photodetector Based on Few-Layer MoS₂ with Sensitivity Enhanced by Localized Surface Plasmon Resonance. *Appl. Surf. Sci.* 2019;483:1037–1043. <https://doi.org/10.1016%2Fj.apsusc.2019.04.044>
13. Li Y., DiStefano J.G., Murthy A.A., Cain J.D., et al. Superior Plasmonic Photodetectors Based on Au@MoS₂ Core–Shell Heterostructures. *ACS Nano*. 2017;11(10):10321–10329. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b05071>
14. Kats M.A., Genevet P., Aoust G., et al. Giant Birefringence in Optical Antenna Arrays with Widely Tailorable Optical Anisotropy. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2012;109(31):12364–12368. <http://doi.org/10.1073/pnas.1210686109>
15. Ross M.B., Blaber M.G., Schatz G.C. Using Nanoscale and Mesoscale Anisotropy to Engineer the Optical Response of Three-Dimensional Plasmonic Metamaterials. *Nat. Commun.* 2014;5(1):4090. <https://doi.org/10.1038/ncomms5090>
16. Li H.-J., Ren Y.-Z., Hu J.-G., Qin M., Wang L.-L. Wavelength-Selective Wide-Angle Light Absorption Enhancement in Monolayers of Transition-Metal Dichalcogenides. *J. Light. Technol.* 2018;36(16):3236–3241. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2840847>
17. Bahauddin S.M., Robotjazi H., Thomann I. Broadband Absorption Engineering to Enhance Light Absorption in Monolayer MoS₂. *ACS Photonics*. 2016;3(5):853–862. <http://doi.org/10.1021/acsp Photonics.6b00081>
18. Ouyang Q., Zeng S., Dinh X.-Q., Coquet P., Yong K.-T. Sensitivity Enhancement of MoS₂ Nanosheet Based Surface Plasmon Resonance Biosensor. *Procedia Eng.* 2016;140:134–139. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.1114>
19. Ouyang Q., Zeng S., Jiang L., et al. Sensitivity Enhancement of Transition Metal Dichalcogenides/Silicon Nanostructure-Based Surface Plasmon Resonance Biosensor. *Sci. Rep.* 2016;6(1):28190. <https://doi.org/10.1038/srep28190>
20. Oumekloul Z., Zeng S., Achouy Y., Mir A., Akjouj A. Multi-Layer MoS₂-Based Plasmonic Gold Nanowires at Near-Perfect Absorption for Energy Harvesting. *Plasmonics*. 2021;16(5):1613–1621. <https://doi.org/10.1007/s11468-021-01405-w>
21. Furchi M.M., Polyushkin D.K., Pospischil A., Mueller T. Mechanisms of Photoconductivity in Atomically Thin MoS₂. *Nano Lett.* 2014;14(11):6165–6170. <https://doi.org/10.1021/nl502339q>
22. Di Bartolomeo A., Genovese L., Foller T., et al. Electrical Transport and Persistent Photoconductivity in Monolayer MoS₂ Phototransistors. *Nanotechnology*. 2017;28(11):214002. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa6d98>
23. Huang Y., Zhuge F., Hou J., et al. Van Der Waals Coupled Organic Molecules with Monolayer MoS₂ for Fast Response Photodetectors with Gate-Tunable Responsivity. *ACS Nano*. 2018;12(4):4062–4073. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b02380>
24. Liu Y., Zhang H., Geng Y., et al. Long-Range Surface Plasmon Resonance Configuration for Enhancing SERS with an Adjustable Refractive Index Sample Buffer to Maintain the Symmetry Condition. *ACS Omega*. 2020;5(51):32951–32958. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03923>
25. Borah R., Smets J., Ninakanti R., et al. Self-Assembled Ligand-Capped Plasmonic Au Nanoparticle Films in the Kretschmann Configuration for Sensing of Volatile Organic Compounds. *ACS Appl. Nano Mater.* 2022;5(8):11494–11505. <http://doi.org/10.1021/acsnm.2c02524>
26. Jamil N.A., Menon P.S., Said F.A., et al. Graphene-Based Surface Plasmon Resonance Urea Biosensor Using Kretschmann Configuration. In: *2017 IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics (RSM)*. IEEE; 2017. P. 112–115. <https://doi.org/10.1109/RSM.2017.8069122>
27. Shukla N., Chetri P., Boruah R., Gogoi A., Ahmed G.A. Surface Plasmon Resonance Biosensors Based on Kretschmann Configuration: Basic Instrumentation and Applications. In: Biswas R., Mazumder N. (Eds.). *Recent Advances in Plasmonic Probes. Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology*. 2022. V. 33. P. 191–222. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99491-4_6
28. Rodrigues E.P., Lima A.M.N., Oliveira L.C., et al. Surface Plasmon Resonance Features of Corrugated Copper and Gold Films: Grating Mode Operation with Wavelength Interrogation. In: *2017 2nd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*. IEEE; 2017. <https://doi.org/10.1109/INSCIT.2017.8103505>
29. Maheswari P., Ravi V., Rajesh K.B., Rajan Jha. High Performance Bimetallic(Cu-Co) Surface Plasmon Resonance Sensor Using Hybrid Configuration of 2D Materials. *J. Environ. Nanotechnol.* 2022;11(3):01–10. <https://doi.org/10.13074/jent.2022.09.223455>
30. West P.R., Ishii S., Naik G.V., Emani N.K., Shalaev V.M., Boltasseva A. Searching for Better Plasmonic Materials. *Laser Photon. Rev.* 2010;4(6):795–808. <https://doi.org/10.1002/lpor.200900055>
31. Rycenga M., Cobley C.M., Zeng J., et al. Controlling the Synthesis and Assembly of Silver Nanostructures for Plasmonic Applications. *Chem. Rev.* 2011;111(6):3669–3712. <https://doi.org/10.1021/cr100275d>
32. Amendola V., Bakr O.M., Stellacci F. A Study of the Surface Plasmon Resonance of Silver Nanoparticles by the Discrete Dipole Approximation Method: Effect of Shape, Size, Structure, and Assembly. *Plasmonics*. 2010;5(1):85–97. <http://doi.org/10.1007/s11468-009-9120-4>
33. Rakić A.D., Djurišić A.B., Elazar J.M., Majewski M.L. Optical Properties of Metallic Films for Vertical-Cavity Optoelectronic Devices. *Appl. Opt.* 1998;37(22):5271. <https://doi.org/10.1364/ao.37.005271>
34. Gu H., Song B., Fang M., et al. Layer-Dependent Dielectric and Optical Properties of Centimeter-Scale 2D WSe₂: Evolution from a Single Layer to Few Layers. *Nanoscale*. 2019;11(47):22762–22771. <http://doi.org/10.1039/C9NR04270A>
35. Leong H.-S., Guo J., Lindquist R.G., Liu Q.H. Surface Plasmon Resonance in Nanostructured Metal Films under the Kretschmann Configuration. *J. Appl. Phys.* 2009;106(12):124314–124314-5. <http://doi.org/10.1063/1.3273359>

Об авторах

Гуськов Андрей Александрович, стажер-исследователь, кафедра наноэлектроники, Институт перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: guskov@mirea.ru. Scopus Author ID 57225969940, ResearcherID AAE-2479-2022, SPIN-код РИНЦ 8000-3575, <https://orcid.org/0000-0002-8462-5811>

Безвиконный Никита Владиславович, стажер-исследователь, кафедра наноэлектроники, Институт перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bezvikonnyj@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0003-2222-4307>

Лавров Сергей Дмитриевич, к.ф.-м.н., доцент, кафедра наноэлектроники, Институт перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: lavrov_s@mirea.ru. Scopus Author ID 55453548100, ResearcherID G-2912-2016, SPIN-код РИНЦ 5918-8994, <https://orcid.org/0000-0002-9432-860X>

About the authors

Andrey A. Guskov, Research Intern, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: guskov@mirea.ru. Scopus Author ID 57225969940, ResearcherID AAE-2479-2022, RSCI SPIN-code 8000-3575, <https://orcid.org/0000-0002-8462-5811>

Nikita V. Bezikonnyj, Research Intern, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bezvikonnyj@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0003-2222-4307>

Sergey D. Lavrov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: lavrov_s@mirea.ru. Scopus Author ID 55453548100, ResearcherID G-2912-2016, RSCI SPIN-code 5918-8994, <https://orcid.org/0000-0002-9432-860X>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 330.4

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-106-116>

EDN WDYUFJ



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Анализ нейросетевых моделей для прогнозирования временных рядов

Б. Пашшоев,
Д.А. Петрусевич @

МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: petrusevich@mirea.ru, petrdenis@mail.ru

Резюме

Цели. Основная цель работы – построить нейросетевые модели временных рядов (LSTM, GRU, RNN) и сравнить результаты прогнозирования с их помощью между собой и с результатами стандартных моделей (ARIMA, ETS), чтобы выяснить, в каких случаях следует пользоваться определенной группой моделей.

Методы. Проведен обзор нейросетевых моделей, рассмотрена структура моделей RNN, LSTM, GRU. Они используются для моделирования временных рядов российской макроэкономической статистики. Качество подстройки моделей под данные и качество прогнозов сравниваются в эксперименте. Нейросетевые и стандартные модели могут применяться как для всего ряда целиком, так и для его частей (тренд и сезонность). При построении прогноза на несколько временных промежутков вперед рассматриваются два подхода: построение прогноза сразу на весь промежуток и пошаговый прогноз. Так появляется несколько комбинаций моделей, которые могут использоваться для прогнозирования. Эти подходы проанализированы в вычислительном эксперименте.

Результаты. Проведено несколько экспериментов, в которых построены и сравниваются по близости прогноза к данным ряда в тестовом периоде стандартные (ARIMA, ETS, LOESS) и нейросетевые модели (LSTM, GRU, RNN).

Выводы. Для сезонных временных рядов модели на основе нейронных сетей превосходили по точности прогноза на тестовый период времени стандартные модели ARIMA, ETS. Одношаговый прогноз вычислительно менее эффективен, чем интегральный прогноз на весь целевой период, но точно указать, для каких рядов какой именно подход оказывается лучшим по качеству, не удается. Комбинированные модели (нейронные сети для тренда, ARIMA – для сезонности) почти всегда дают хороший результат. При прогнозировании не-сезонного гетероскедастичного ряда курса акций лучшие результаты показали стандартные подходы (метод LOESS и модель ETS).

Ключевые слова: динамические ряды, макроэкономическая статистика, GRU, LSTM, RNN, DNN, временные ряды

• Поступила: 21.06.2023 • Доработана: 15.02.2024 • Принята к опубликованию: 26.05.2024

Для цитирования: Пашшоев Б., Петрусевич Д.А. Анализ нейросетевых моделей для прогнозирования временных рядов. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):106–116. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-106-116>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Neural network analysis in time series forecasting

Bakhtierzhon Pashshoev,
Denis A. Petrushevich @

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
@ Corresponding author, e-mail: petrushevich@mirea.ru, petrdenis@mail.ru

Abstract

Objectives. To build neural network models of time series (LSTM, GRU, RNN) and compare the results of forecasting with their mutual help and the results of standard models (ARIMA, ETS), in order to ascertain in which cases a certain group of models should be used.

Methods. The paper provides a review of neural network models and considers the structure of RNN, LSTM, and GRU models. They are used for modeling time series in Russian macroeconomic statistics. The quality of model adjustment to the data and the quality of forecasts are compared experimentally. Neural network and standard models can be used both for the entire series and for its parts (trend and seasonality). When building a forecast for several time intervals in the future, two approaches are considered: building a forecast for the entire interval at once, and step-by-step forecasting. In this way there are several combinations of models that can be used for forecasting. These approaches are analyzed in the computational experiment.

Results. Several experiments have been conducted in which standard (ARIMA, ETS, LOESS) and neural network models (LSTM, GRU, RNN) are built and compared in terms of proximity of the forecast to the series data in the test period.

Conclusions. In the case of seasonal time series, models based on neural networks surpassed the standard ARIMA and ETS models in terms of forecast accuracy for the test period. The single-step forecast is computationally less efficient than the integral forecast for the entire target period. However, it is not possible to accurately indicate which approach is the best in terms of quality for a given series. Combined models (neural networks for trend, ARIMA for seasonality) almost always give good results. When forecasting a non-seasonal heteroskedastic series of share price, the standard approaches (LOESS method and ETS model) showed the best results.

Keywords: dynamic series, macroeconomic statistics, GRU, LSTM, RNN, DNN, time series

• Submitted: 21.06.2023 • Revised: 15.02.2024 • Accepted: 26.05.2024

For citation: Pashshoev B., Petrushevich D.A. Neural network analysis in time series forecasting. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):106–116. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-106-116>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках представленной работы анализируются применение распространенных нейросетевых моделей для прогнозирования временных рядов. Теме прогнозирования временных рядов посвящено много исследований. Фактически на практике используются несколько готовых подходов, например: модели ARIMA (autoregressive integrated moving average), модели ETS (exponential smoothing) [1, 2], построение регрессий, отражающих зависимости между параметрами, изменяющимися во времени, которые можно отнести к статистическим моделям [3]; модели GARCH (generalized autoregressive

conditional heteroscedasticity) используются при фиксации явления гетероскедастичности [1, 2]; возможна тренировка готовых нейросетевых моделей LSTM (long short-term memory), GRU (gated recurrent unit) по имеющимся данным временных рядов. Можно отметить множество публикаций, где для описания некоторого временного процесса строится сразу несколько моделей разных типов, их прогнозы используются совместно (они указаны далее при описании моделей). Оценке точности прогноза при применении комбинации моделей ARIMA посвящены работы [4, 5]. В связи с наличием множества моделей существенную роль приобретает вопрос о том, какие из них следует использовать для

моделирования временного процесса в зависимости от его свойств [6]. В рамках экспериментальной части работы рассматривается представление сезонных ежемесячных временных рядов денежных доходов населения (НИИ) и индекса реального объема сельскохозяйственного производства (AGR)¹ и несезонных временных рядов, представленных курсами акций и биржевыми индексами (в частности, курс акций Сбербанка России)². Основной целью работы является определение, какими моделями следует пользоваться для моделирования временных процессов.

В экспериментальной части рассмотрено построение моделей временных рядов ARIMA, нейросетевых моделей LSTM, GRU, RNN³, полносвязных нейронных сетей. Выполнено сравнение их прогнозов на тестовый период. Качество нейросетевых моделей, построенных по таким данным, сравнивается с качеством статистических моделей ARIMA/ETS по информационным критериям и качеству прогноза на тестовый промежуток времени.

РАССМАТРИВАЕМЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

При прогнозировании временного ряда модель можно построить множеством способов. В частности, обучать нейронную сеть или строить статистическую модель можно на основе исходных значений временного ряда, но, с другой стороны, можно использовать разделение ряда на сезонную составляющую и тренд.

Обычно тренд T_t – это детерминированная часть временного ряда y_t с сезонной составляющей S_t (ее может не быть), а также шумом R_t , где t – время. Ряд можно представить в аддитивной (1) или мультипликативной (2) форме:

$$y_t = S_t + T_t + R_t, \quad (1)$$

$$y_t = S_t \times T_t \times R_t. \quad (2)$$

¹ Единый архив экономических и социологических данных. Динамические ряды макроэкономической статистики РФ. Индексы заработной платы, денежных доходов населения; реального объема сельскохозяйственного производства. <https://web.archive.org/web/20230317111717/http://sophist.hse.ru/hse/nindex.shtml>. Дата обращения 01.06.2024. [Unified archive of economic and sociological data. Dynamic series of macroeconomic statistics of the Russian Federation. Indices of wages, monetary incomes of the population; real volume of agricultural production. <https://web.archive.org/web/20230317111717/http://sophist.hse.ru/hse/nindex.shtml> (in Russ.). Accessed June 01, 2024.]

² Курс акций ПАО Сбербанк (SBER). <https://www.moex.com/ru/issue.aspx?board=TQBR&code=SBER>. Дата обращения 01.06.2024. [SberBank share price (SBER). <https://www.moex.com/ru/issue.aspx?board=TQBR&code=SBER> (in Russ.). Accessed June 01, 2024.]

³ Recurrent neural networks.

Эти подходы эквивалентны.

При этом, одна из самых распространенных моделей для описания временного ряда, не опирающаяся на нейронные сети, – ARIMA(p, d, q), состоящая из авторегрессионной части (autoregressive model) (для модели порядка p значения ряда X ставятся в зависимость от p своих предыдущих значений):

$$X_t = c + \varphi_1 X_{t-1} + \dots + \varphi_p X_{t-p},$$

где $\varphi_i, i = \overline{1, p}$ – коэффициенты функции; и из части скользящего среднего (moving average) порядка q [1]:

$$X_t = \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q}.$$

где $\theta_i, i = \overline{1, q}$ – коэффициенты функции. Порядок d обозначает число дифференцирований ряда.

Фактически при построении модели от тренда избавляются, переходя к стационарной временной разности (многократным дифференцированием ряда до того момента, пока статистический тест не подтвердит стационарность) [1, 6]. Работа ведется с преобразованным стационарным временным рядом. В рамках вычислительной части исследования мы сравниваем результаты ее работы с прогнозами других моделей.

Так как, согласно разложениям (1), (2), при моделировании можно отделить части, отвечающие за сезонные колебания и шум, обучение нейронной сети можно проводить как на исходных данных, так и отдельно на тренде. Из-за возможности подобного разделения в вычислительном эксперименте представлено несколько подходов к подготовке данных для обучения нейронной сети. Нейросетевые модели позволяют прогнозировать как тренд, так и сезонность, поэтому есть способ, в котором тренд и сезонность отдельно прогнозируются с помощью своих моделей, а результаты затем объединяются; во втором подходе данные не разделяются (используется, например в моделях ARIMA, ETS). При «моделировании» тренда предварительно временной ряд разделяется на тренд, сезонную составляющую и шум. На данных тренда обучается нейросетевая модель, только тренд прогнозируется с ее помощью после обучения. Затем из прогноза по тренду, а также моделей сезонной составляющей и шума собирается окончательный прогноз. Разделение на тренд, шум и сезонность проводится при помощи метода LOESS (STL)⁴ [1].

Кроме этого, само по себе прогнозирование тоже можно проводить двумя способами. Дело в том, что

⁴ LOESS, locally estimated scatterplot smoothing – метод локального сглаживания диаграммы рассеивания; STL, seasonal and trend decomposition using LOESS – метод разложения временных рядов на тренд, сезонность и остатки.

обычно исследователя интересует прогноз не на один шаг вперед, а на несколько или на целый сезон (если ряд сезонный). Таким образом можно оценить, насколько хорошо модель описывает данные ряда. Но прогноз на несколько шагов вперед можно провести как сразу (интегральный прогноз), так и по одному шагу (одношаговый). Во втором случае каждое спрогнозированное значение становится новой частью обучающей выборки, по которой постоянно корректируется модель, а само прогнозирование на каждой итерации делается только на один шаг вперед. Оба подхода сравниваются в вычислительном эксперименте в виде одношагового и многошагового прогнозов.

В вычислительном эксперименте участвуют несколько моделей: полносвязные нейронные сети (dense neural networks, DNN), рекуррентные нейронные сети (RNN), сети долгой краткосрочной памяти (LSTM), управляемый рекуррентный блок (GRU).

Полносвязные нейронные сети – широко известная архитектура нейронных сетей [7]. Каждый нейрон получает сигнал от всех нейронов предыдущего слоя (за исключением входов сети), применяет к их взвешенной комбинации функцию активации и передает результат нейронам следующего слоя. При обучении полносвязных нейронных сетей используются различные методы оптимизации, например: градиентный спуск и его модификации. Однако из-за большого количества параметров полносвязные сети могут быть подвержены переобучению. Для борьбы с переобучением используются методы регуляризации, такие как L1 и L2, а также методы дропаута (dropout). Структура сети представлена на рис. 1.

Рекуррентные нейронные сети RNN [9, 10] используются для моделирования функциональных отношений между входными признаками в недавнем прошлом и целевой переменной в будущем. Как показано на рис. 2, RNN периодически обучается на наборе исторических данных, фокусируясь на переходах внутреннего (скрытого) состояния от временного состояния $t - 1$ к отсечке t . Полученная модель определяется двумя матрицами весов \mathbf{W}_{xs} и \mathbf{W}_{ys} , а также двумя векторами смещения \mathbf{b}_s и \mathbf{b}_y . Выход \mathbf{y}_t зависит от внутреннего состояния \mathbf{S}_t , которое зависит как от текущего входа \mathbf{x}_t , так и от предыдущего состояния \mathbf{S}_{t-1} :

$$\mathbf{S}_t = \text{th}[\mathbf{W}_{xs}(\mathbf{x}_t \oplus \mathbf{S}_{t-1}) + \mathbf{b}_s],$$

$$\mathbf{y}_t = \sigma(\mathbf{W}_{ys}\mathbf{S}_t + \mathbf{b}_y).$$

Здесь \mathbf{x}_t – входной вектор в момент времени t , $\sigma(\mathbf{x})$ – сигмоидная функция, операция \oplus – конкатенация. Основным недостатком RNN – проблема затухания градиента, из-за которой со временем он становится малым. Это выражается в том, что RNN запоминает информацию только на короткие промежутки времени.

Сети долгой краткосрочной памяти (LSTM) [11–26] представляют собой вариант RNN, который частично решает проблему затухающего градиента и обучает более долгосрочным зависимостям во временных рядах. Они описываются на момент времени t в терминах внутреннего (скрытого) состояния \mathbf{S}_t и состояния ячейки \mathbf{C}_t . Состояние \mathbf{C}_t зависит от трех параметров: предыдущего состояния ячейки \mathbf{C}_{t-1} ,

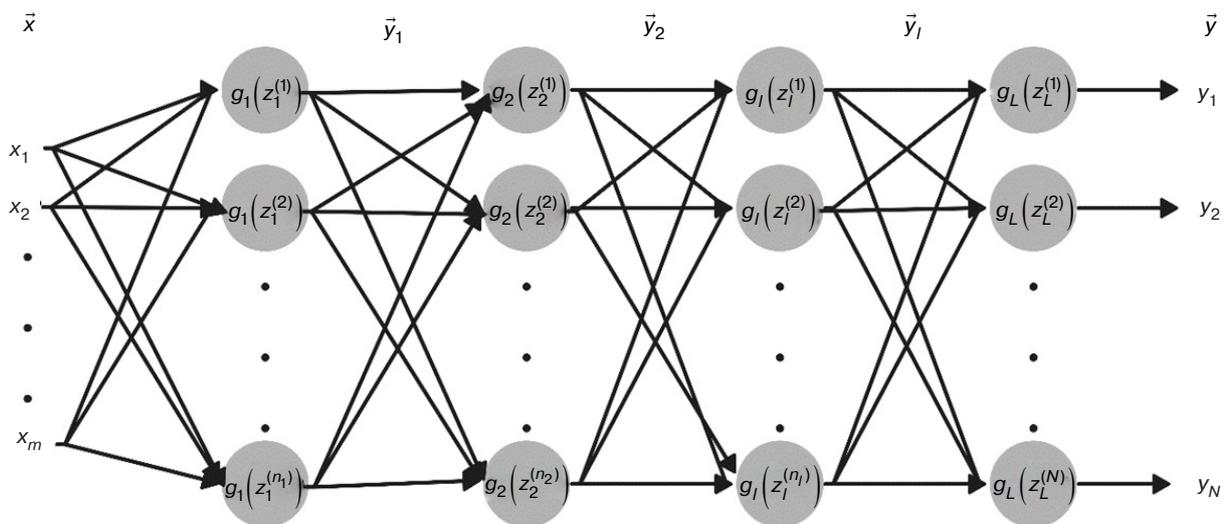


Рис. 1. Структура полносвязной нейронной сети DNN [8]. \vec{x} – входной вектор, \vec{y}_i – вектор на выходе i -го слоя сети, \vec{y} – выходной вектор всей сети (результат). $g(\cdot)$ – функция активации, z_j^i – вход j -го нейрона в i -м слое – взвешенная линейная комбинация результатов предыдущего слоя (веса настраиваются при обучении)

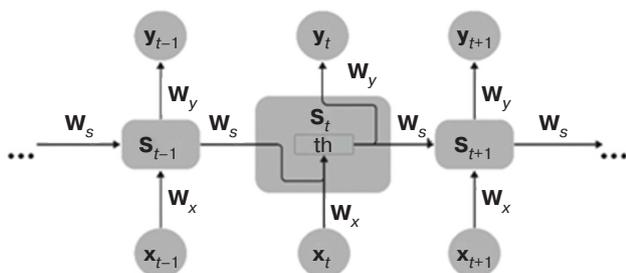


Рис. 2. Структура рекуррентной нейронной сети RNN [8]

предыдущего внутреннего состояния S_{t-1} и входа на текущий момент времени x_t . Процесс, изображенный на рис. 3, позволяет удалить/фильтровать, умножить/объединять и добавлять информацию с использованием забывающего (forget), входного (input), добавочного (addition) и выходного (output) вентиля (gates), реализованных функциями x_f, i_f, \tilde{C}_t и O_t соответственно, что позволяет более точно контролировать обучение долгосрочным зависимостям.

Эти функции связаны следующим образом:

$$\begin{aligned} f_t &= \sigma(W_f(x_t \oplus S_{t-1}) + b_f), \\ i_t &= \sigma(W_i(x_t \oplus S_{t-1}) + b_i), \\ \tilde{C}_t &= \text{th}(W_c(x_t \oplus S_{t-1}) + b_c), \\ C_t &= f_t C_{t-1} + i_t \tilde{C}_t, \\ O_t &= \sigma(W_o(x_t \oplus S_{t-1}) + b_o), \\ S_t &= O_t \text{th}(C_t), \\ y_t &= \sigma(W_y S_t + b_y), \end{aligned}$$

где W_f, W_i, W_c, W_o, W_y – различные весовые матрицы, участвующие в обучении. Функции используются для прогнозирования как самостоятельно (например, распространение коронавируса в работах [12, 19, 26] моделируется на основе LSTM), так и в комбинации с другими моделями [14, 15], или применяется комбинация прогноза этой модели с результатами других моделей. В работах [12, 16, 24, 26] используется

глубокое обучение для настройки моделей на основе LSTM. В [11, 13, 19, 20] модели на основе LSTM сравниваются с другими часто используемыми моделями при прогнозировании определенного временного процесса.

Управляемые рекуррентные блоки (GRU) [13, 25, 27–29] представляют собой вариант LSTM, который еще лучше решает проблему затухающего градиента. Как следует из рис. 4, новизна этого метода заключается в использовании вентиля обновления, сброса и третьего вентиля, реализованных функциями z_f, r_f, \tilde{S}_t соответственно. Каждый элемент выполняет свою роль в контроле фильтрации, использования и объединения предыдущей информации. Первый член в выражении для следующего состояния $(1 - z_t)S_{t-1}$ позволяет настроить, что сохранить из прошлого, а элемент $z_t \tilde{S}_t$ определяет, что необходимо использовать из текущего содержания памяти.

Указанные функции связаны следующим образом:

$$\begin{aligned} r_t &= \sigma(W_r(x_t \oplus S_{t-1}) + b_r), \\ z_t &= \sigma(W_z(x_t \oplus S_{t-1}) + b_z), \\ \tilde{S}_t &= \text{th}(W_s(x_t \oplus S_{t-1}) + b_s), \\ S_t &= (1 - z_t)S_{t-1} + z_t \tilde{S}_t, \\ y_t &= \sigma(W_y S_t + b_y). \end{aligned}$$

В литературе встречаются как применение ансамблей элементов GRU с другими нейронными сетями (в [27, 28] с сетями CNN [7]), так и каскадное построение элементов [29].

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В рамках данной работы приведем результаты трех экспериментов по представлению ежемесячных временных рядов: денежных доходов населения (НИИ), индекса реального объема

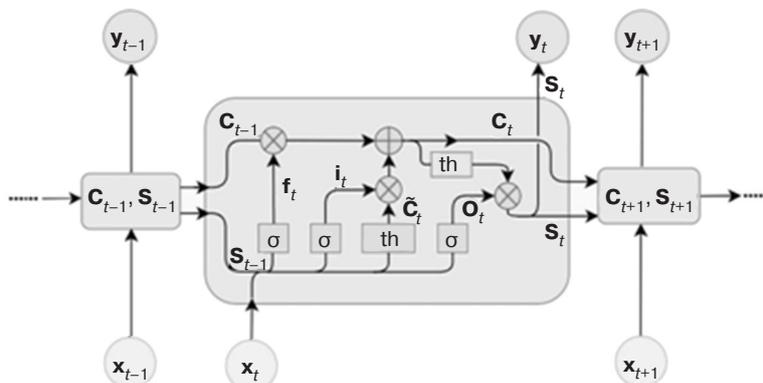


Рис. 3. Структура долгой краткосрочной памяти LSTM [8]

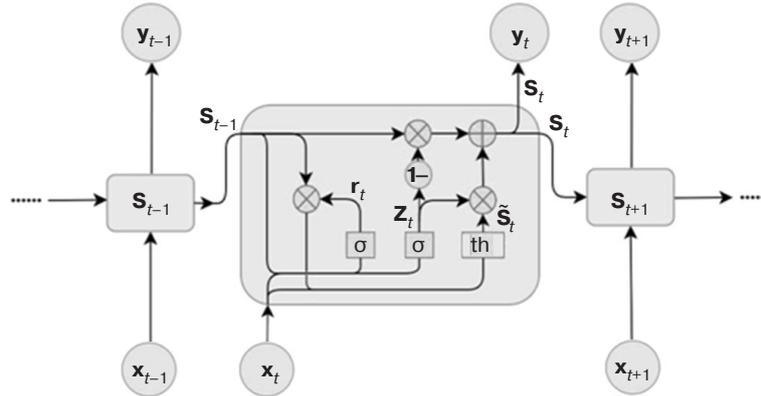


Рис. 4. Структура управляемого рекуррентного блока GRU [8]

сельскохозяйственного производства (AGR) (индексы имеют безразмерные единицы измерения) и ежедневного временного ряда курса акций Сбербанка России, измеряемого в рублях.

Полносвязная нейронная сеть имеет структуру, представленную в табл. 1.

Таблица 1. Структура полносвязной нейронной сети DNN

Тип прогноза	Номер слоя	Число нейронов
Одношаговый	Входной слой, 0	6
	Слой 1, 5	64
	Слой 2–4	128
	Выходной слой, 6	1
Интегральный (прогноз на 12 временных отрезков вперед)	Входной слой, 0	24
	Слой 1, 5	64
	Слой 2–4	128
	Выходной слой, 6	12

При одношаговом прогнозе сеть делает прогноз на 1 шаг вперед, эти данные становятся частью обучающих, затем делается следующий шаг (в выходном слое один нейрон). При интегральном подходе прогноз делается сразу на 12 шагов вперед (на год, т.к. рассматривается ряд с годичной сезонностью; в выходном слое 12 нейронов).

Для оценки прогнозов моделей рассматриваются меры близости вектора прогноза и вектор реальных значений величины [1, 2]:

$$\begin{aligned}
 \text{RMSE} &= \sqrt{\frac{\sum (\tau(t) - ts(t))^2}{N}}, \\
 \text{MAE} &= \frac{\sum |\tau(t) - ts(t)|}{N}.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Здесь RMSE (root mean square error) – среднеквадратичная ошибка; MAE (mean absolute error) – средняя абсолютная ошибка; $\tau(t)$ – реальные значения временного ряда; $ts(t)$ – прогноз математической модели; N – длина отрезка прогнозирования (чаще всего совпадает с сезонностью; в основном речь идет о временных рядах с годичной сезонностью, поэтому $N = 12$).

Архитектура сети RNN, выбранная для интегрального прогнозирования тренда с шагом 12, состоит из трех слоев RNN (каждый содержит по 64 нейрона), а также из единственного слоя полносвязных нейронов (по количеству прогнозируемых значений – 12). На вход модели подается временное окно размера w . В результате экспериментов было установлено, что единственный слой не способен выявить сезонность, а добавление более трех слоев не приводит к существенному улучшению качества прогнозирования. По этой причине выбрано три слоя. Общее количество обучаемых параметров в модели составляет 21516.

Для одношагового прогнозирования тренда была выбрана более простая модель, содержащая только один слой RNN с 64 нейронами и входной слой с единственным нейроном, что привело к существенному уменьшению количества обучаемых параметров до 4289, поскольку добавление дополнительных слоев не привело к заметному улучшению качества прогнозирования.

Архитектуры LSTM и GRU были выбраны идентичными по структуре модели сети RNN, описанной выше. Однако количество обучаемых параметров LSTM для двух различных архитектур составляет 83724 и 16961 соответственно, а для GRU – 63564 и 12929.

В экспериментах участвуют классические модели ARIMA и ETS [1, 2]. В методе LOESS на основе разложения STL выделяется тренд, который прогнозируется на тестовый период с помощью модели ARIMA. На прогноз на тестовый период

Таблица 2. Модели индекса денежных доходов по данным макроэкономической статистики РФ и их прогнозы на тестовый период

Модель временного ряда	MAE	RMSE
Многочлен 4 степени + сезонность ARIMA(1, 1, 2)	3.42	4.52
Метод LOESS	3.49	4.57
ARIMA(6, 1, 5) с сезонностью (0, 1, 1) ₁₂	5.86	7.01
ETS	6.57	8.47
Модель DNN для тренда, одношаговый прогноз	4.21	5.58
Модель DNN для тренда, интегральный прогноз	3.88	4.58
Модель DNN для тренда и сезонности, одношаговый прогноз	2.44	3.06
Модель DNN для тренда, ARIMA(1, 1, 2) для сезонности, одношаговый прогноз	1.73	1.97
Модель DNN для тренда и сезонности, интегральный прогноз	2.48	3.36
Модель DNN для тренда, модель ARIMA(1, 1, 2) для сезонности, интегральный прогноз	2.29	2.62
Модель RNN для тренда, одношаговый прогноз	6.25	7.68
Модель RNN для тренда, интегральный прогноз	4.65	5.86
Модель RNN для тренда и сезонности, одношаговый прогноз	4.32	4.72
Модель RNN для тренда, модель ARIMA(1, 1, 2) для сезонности, одношаговый прогноз	2.82	3.3
Модель RNN для тренда и сезонности, интегральный прогноз	3.88	4.45
Модель RNN для тренда, модель ARIMA(1, 1, 2) для сезонности, интегральный прогноз	2.35	2.95
Модель LSTM для тренда, одношаговый прогноз	23.43	30.68
Модель LSTM для тренда, интегральный прогноз	18.97	30.09
Модель LSTM для тренда и сезонности, одношаговый прогноз	3.83	4.25
Модель LSTM для тренда, модель ARIMA(1, 1, 2) для сезонности, одношаговый прогноз	2.42	2.79
Модель LSTM для тренда и сезонности, интегральный прогноз	5.91	6.63
Модель LSTM для тренда, модель ARIMA для сезонности, интегральный прогноз	5.03	5.40
Модель GRU для тренда, одношаговый прогноз	19.00	29.28
Модель GRU для тренда, интегральный прогноз	20.05	27.30
Модель GRU для тренда и сезонности, одношаговый прогноз	3.81	4.24
Модель GRU для тренда, модель ARIMA(1, 1, 2) для сезонности, одношаговый прогноз	2.40	2.76
Модель GRU для тренда и сезонности, интегральный прогноз	3.94	4.36
Модель GRU для тренда, модель ARIMA(1, 1, 2) для сезонности, интегральный прогноз	2.41	2.89

накладывается модель сезонности. Кроме этого, тренд оценивался с помощью многочлена, сезонность оценивалась с помощью ARIMA, и результаты совмещались.

В эксперименте 1 рассматривается индекс денежных доходов населения России за период 2000–2020 гг. Все рассматриваемые модели настраивались на периоде обучения 2000–2020 гг. (из него удалены кризисные годы 2008 и 2014, данные склеены), результаты их прогнозов на тестовый период (2021 г.) сопоставлены в табл. 2.

По анализу функций ACF/PACF⁵ сделан вывод о наличии сезонности в 12 месяцев (что подтверждается статистическими тестами) и выделены математические модели ARIMA(p, d, q). Их подбор и анализ подробно изложен в работах [3, 30].

Отметим, что наилучшие прогнозы получены для комбинации моделей (нейросетевая модель для

⁵ ACF, autocorrelation function – автокорреляционная функция; PCF, partial autocorrelation function – частичная автокорреляционная функция.

тренда, ARIMA для сезонности). При этом практически любая модель для тренда дает хорошие результаты (лучшие у полносвязной сети). Модель LSTM лучше провела одношаговый прогноз, модели RNN, DNN – интегральные, а модель GRU сработала хорошо при обоих подходах. В этом эксперименте нейросетевые модели превзошли стандартные модели временных рядов.

В эксперименте 2 рассматривается индекс реального объема сельскохозяйственного производства России за период 2000–2020 гг. (подробный анализ ряда представлен в [30]). Все рассматриваемые модели настраивались на данном периоде обучения, кризисные 2008 и 2014 гг. из него удалены, данные склеены. Результаты прогнозов на тестовый период (2021 г.) сопоставлены в табл. 3.

Таблица 3. Модели индекса реального объема сельскохозяйственного производства по данным макроэкономической статистики РФ и их прогнозы на тестовый период

Модель временного ряда	MAE	RMSE
Многочлен 1 степени + ARIMA(2, 0, 1) с сезонностью (2, 1, 1) ₁₂	67.04	77.76
Логарифмическая функция $y = a_0 + a_1 \ln x$	55.04	80.92
Экспоненциальная функция $y = \exp(a_0 + a_1 x)$	53.00	90.48
ARIMA(3, 0, 1) с сезонностью (2, 1, 2) ₁₂	13.24	18.51
ETS	17.22	25.40
Модель DNN для тренда, одношаговый прогноз	15.97	29.70
Модель DNN для тренда, интегральный прогноз	14.63	26.61
Модель DNN для тренда и сезонности, одношаговый прогноз	9.75	16.18
Модель DNN для тренда, модель ARIMA(2, 0, 1) × (2, 1, 1) ₁₂ для сезонности, одношаговый прогноз	8.71	11.94
Модель DNN для тренда и сезонности, интегральный прогноз	9.09	15.31
Модель DNN для тренда, ARIMA(2, 0, 1) × (2, 1, 1)₁₂ для сезонности, интегральный прогноз	6.81	10.90
Модель RNN для тренда, одношаговый прогноз	17.02	23.72
Модель RNN для тренда, интегральный прогноз	13.94	16.66
Модель RNN для тренда и сезонности, одношаговый прогноз	8.37	14.67
Модель RNN для тренда, модель ARIMA для сезонности, одношаговый прогноз	6.72	10.53
Модель RNN для тренда и сезонности, интегральный прогноз	10.51	16.17
Модель RNN для тренда, модель ARIMA(2, 0, 1) × (2, 1, 1) ₁₂ для сезонности, интегральный прогноз	8.95	11.81
Модель LSTM для тренда, одношаговый прогноз	26.56	38.00
Модель LSTM для тренда, интегральный прогноз	23.35	31.07
Модель LSTM для тренда и сезонности, одношаговый прогноз	8.39	14.76
Модель LSTM для тренда, модель ARIMA(2, 0, 1) × (2, 1, 1)₁₂ для сезонности, одношаговый прогноз	6.87	10.58
Модель LSTM для тренда и сезонности, интегральный прогноз	8.78	15.41
Модель LSTM для тренда, модель ARIMA(2, 0, 1) × (2, 1, 1) ₁₂ для сезонности, интегральный прогноз	7.30	11.13
Модель GRU для тренда, одношаговый прогноз	24.82	34.09
Модель GRU для тренда, интегральный прогноз	21.47	26.67
Модель GRU для тренда и сезонности, одношаговый прогноз	8.90	15.48
Модель GRU для тренда, модель ARIMA(2, 0, 1) × (2, 1, 1) ₁₂ для сезонности, одношаговый прогноз	7.88	11.24
Модель GRU для тренда и сезонности, интегральный прогноз	10.11	16.34
Модель GRU для тренда, модель ARIMA(2, 0, 1) × (2, 1, 1) ₁₂ для сезонности, интегральный прогноз	8.87	12,09

По функциям ACF/PACF можно сделать вывод о наличии сезонности в 12 месяцев (что подтверждается статистическими тестами). Также из-за наличия всплеска на графике PACF были проверены все модели ARIMA(p, d, q) с порядками p, q от 1 до 6. Для комбинации моделей, в которой стандартная модель ARIMA используется для описания сезонности, а тренд задается с помощью нейросетевой модели или многочлена, используется модель ARIMA(2, 0, 1) с годичной сезонностью вида $(2, 1, 1)_{12}$.

Отметим, что наилучшие прогнозы получены для комбинации моделей (нейросетевая модель для тренда, ARIMA для сезонности). При этом для тренда хорошие результаты дают не все модели (лучшие у RNN, DNN и LSTM). Модели RNN и LSTM лучше провели одношаговый прогноз, DNN – интегральный. В этом эксперименте нейросетевые модели превзошли стандартные модели временных рядов.

Отдельно рассмотрим ряд курса биржевых акций – акций Сбербанка России. Он обладает гетероскедастичностью: у него меняется математическое ожидание и дисперсия со временем. Это подтверждается тестом Маклеода – Ли (все компоненты результирующего вектора – нулевые с точностью до 0.01) [31]. В связи с тем, что он несезонный, для каждой нейросетевой системы возможными остаются только два подхода: сделать прогноз сразу на весь тестовый период (интегральный) или делать пошаговые прогнозы, объявляя каждый новый шаг частью обучающей выборки для перехода к следующему моменту времени. Они явно указывают на отсутствие сезонности и необходимость проверить модели второго порядка. Для ряда выбрана модель ARIMA(2, 1, 3) (анализ ряда приведен в [30]).

Результаты прогнозирования представлены в табл. 4.

Лучшие результаты показывают «классические» методы моделирования рядов: LOESS, модели ETS и ARIMA. Из нейросетевых методов лучший результат показала модель GRU. Во всех случаях прогнозы, сделанные на один шаг вперед несколько раз, лучше одного прогноза на некоторый период.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для сезонных временных рядов модели на основе нейронных сетей превосходят стандартные модели по точности прогноза на тестовый период времени. Точность прогноза нейросетевых моделей во всех экспериментах оказалась лучше, чем при использовании моделей ARIMA/ETS. Одношаговый прогноз представляется вычислительно менее эффективным, чем интегральный прогноз сразу на весь целевой период, но точно указать, для каких рядов лучшим по качеству оказывается одношаговый прогноз или интегральный, не удается.

Комбинированные модели, в которых нейросетевые модели используются для моделирования тренда, а модель ARIMA используется для моделирования сезонности (при разложении на тренд, шум и сезонность, например, с помощью STL), почти всегда дают хороший результат. Чаще всего результат именно такой модели и становится лучшим. При этом, т.к. результаты оказываются примерно равными, в силу меньшей сложности построения и обучения, модели RNN и полносвязной сети DNN выглядят предпочтительнее.

При прогнозировании несезонных рядов рекомендуется использовать одношаговый прогноз (каждое спрогнозированное значение объявляется частью обучающей выборки для предсказания следующего значения). При прогнозировании курса

Таблица 4. Модели временного ряда курса акций Сбербанка России

Модель временного ряда	MAE	RMSE
Метод LOESS	0.004	0.006
ARIMA (2, 1, 3)	11.23	42.11
ETS	4.95	20.68
Модель DNN для тренда, одношаговый прогноз	23.49	27.22
Модель DNN для тренда, интегральный прогноз	51.00	62.80
Модель RNN для тренда, одношаговый прогноз	16.42	21.69
Модель RNN для тренда, интегральный прогноз	80.53	86.39
Модель LSTM для тренда, одношаговый прогноз	49.74	59.32
Модель LSTM для тренда, интегральный прогноз	76.95	81.40
Модель GRU для тренда, одношаговый прогноз	7.14	29.28
Модель GRU для тренда, интегральный прогноз	24.66	85.05

акций Сбербанка России лучшие результаты показали стандартные модели и RNN.

При построении нейронных сетей, моделирующих поведение временных рядов, следует использовать несколько слоев (в работе использовалось 5–6 слоев). Сети с 1–2 слоями не извлекают

полезные для прогнозирования признаки даже при повышении числа нейронов в слое.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Hyndman R.J., Athanasopoulos G. *Forecasting: principles and practice*. 3rd ed. OTexts; 2021. 442 p. ISBN-13 978-0987507136
- Stock J.H., Watson M.W. *Introduction to Econometrics*. 3rd ed. Pearson; 2019. ISBN-13 978-9352863501
- Калугин Т.Р., Ким А.К., Петрусевич Д.А. Анализ моделей $ADL(p, q)$, используемых для описания связей между временными рядами. *Russ. Technol. J.* 2020;8(2):7–22. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-2-7-22> [Kalugin T.R., Kim A.K., Petrusевич D.A. Analysis of the high order $ADL(p, q)$ models used to describe connections between time series. *Russ. Technol. J.* 2020;8(2):7–22 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-2-7-22>]
- Petrusevich D. Improvement of time series forecasting quality by means of multiple models prediction averaging. In: *Proceedings of the Third International Workshop on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-2021)*. 2021;2899:109–117. <https://doi.org/10.47813/dnit-mip3/2021-2899-109-117>
- Beletskaya N., Petrusевич D. Linear combinations of time series models with minimal forecast variance. *J. Commun. Technol. Electron.* 2023;67(1):144–158. <https://doi.org/10.1134/S1064226922130022>
- Box G., Jenkins G. *Time Series Analysis: Forecast and Management*. John Wiley & Sons; 2015. 712 p. ISBN 978-11185674918
- Haykin S. *Neural Networks and Learning Machines*. Pearson Education; 2011. 936 p. ISBN 978-0133002553
- Shi J., Jain M., Narasimhan G. *Time Series Forecasting (TSF) Using Various Deep Learning Models*. 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2204.11115v1>, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.11115>
- Amalou I., Mouhni N., Abdali A. Multivariate time series prediction by RNN architectures for energy consumption forecasting. *Energy Rep.* 2022;8:1084–1091. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.139>
- Aseeri A. Effective RNN-Based forecasting methodology design for improving short-term power load forecasts: application to large-scale power-grid time series. *J. Computational Sci.* 2023;68(4):101984. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2023.101984>
- Ning Y., Kazemi H., Tahmasebi P. A comparative machine learning study for time series oil production forecasting: ARIMA, LSTM, and Prophet. *Comput. Geosci.* 2022;164(1):105126. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105126>
- Wang P., Zheng X., Ai G., Liu D., Zhu B. Time series prediction for the epidemic trends of COVID-19 using the improved LSTM deep learning method: Case studies in Russia, Peru and Iran. *Chaos, Solitons & Fractals.* 2020;140:110214. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110214>
- Arunkumar K.E., Kalaga D.V., Kumar M.S., Kawaji M., Brenza T.M. Comparative analysis of Gated Recurrent Units (GRU), long Short-Term memory (LSTM) cells, autoregressive Integrated moving average (ARIMA), seasonal autoregressive Integrated moving average (SARIMA) for forecasting COVID-19 trends. *Alexandria Eng. J.* 2022;61(10):7585–7603. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.011>
- Kumar B., Sunil, Yadav N. A novel hybrid model combining $\beta SARMA$ and LSTM for time series forecasting. *Appl. Soft Comput.* 2023;134:110019. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110019>
- Abebe M., Noh Y., Kang Y.-J., Seo C., Kim D., Seo J. Ship trajectory planning for collision avoidance using hybrid ARIMA-LSTM models. *Ocean Eng.* 2022;256:111527. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111527>
- Cascone L., Sadiq S., Ullah S., Mirjalili S., Ur H., Siddiqui R., Umer M. Predicting household electric power consumption using multi-step time series with convolutional LSTM. *Big Data Res.* 2023;31:100360. <https://doi.org/10.1016/j.bdr.2022.100360>
- Wang H., Zhang Y., Liang J., Liu L. DAFA-BiLSTM: Deep Autoregression Feature Augmented Bidirectional LSTM network for time series prediction. *Neural Netw.* 2023;157:240–256. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2022.10.009>
- Zhao L., Mo C., Ma J., Chen Z., Yao C. LSTM-MFCN: A time series classifier based on multi-scale spatial-temporal features. *Computer Commun.* 2022;182(3):52–59. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.10.036>
- Rasjid Z.E., Setiawan R., Effendi A. A Comparison: Prediction of Death and Infected COVID-19 Cases in Indonesia Using Time Series Smoothing and LSTM Neural Network. *Procedia Comput. Sci.* 2021;179(5):982–988. <http://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.102>
- Dubey A.K., Kumar A., García-Díaz V., Sharma A.K., Kanhaiya K. Study and analysis of SARIMA and LSTM in forecasting time series data. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2021;47:101474. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101474>
- Wu Z., Yin H., He H., Li Y. Dynamic-LSTM hybrid models to improve seasonal drought predictions over China. *J. Hydrol.* 2022;615:128706. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128706>
- Yan Y., Wang X., Ren F., Shao Z., Tian C. Wind speed prediction using a hybrid model of EEMD and LSTM considering seasonal features. *Energy Rep.* 2022;8:8965–8980. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.007>

23. Bian S., Wang Z., Song W., Zhou X. Feature extraction and classification of time-varying power load characteristics based on PCANet and CNN+Bi-LSTM algorithms. *Electric Power Systems Research*. 2023;217(6):109149. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109149>
24. Sangiorgio M., Dercole F. Robustness of LSTM neural networks for multi-step forecasting of chaotic time series. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2020;139(8):10045. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110045>
25. Liu X., Lin Z., Feng Z. Short-term offshore wind speed forecast by seasonal ARIMA – A comparison against GRU and LSTM. *Energy*. 2021;227:120492. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120492>
26. Shahid F., Zameer A., Muneeb M. Predictions for COVID-19 with deep learning models of LSTM, GRU and Bi-LSTM. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2020;140:110212. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110212>
27. Wang J., Wang P., Tian H., Tansey K., Liu J., Quan W. A deep learning framework combining CNN and GRU for improving wheat yield estimates using time series remotely sensed multi-variables. *Comput. Electron. Agric.* 2023;206(4):107705. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107705>
28. Hua H., Liu M., Li Y., Deng S., Wang Q. An ensemble framework for short-term load forecasting based on parallel CNN and GRU with improved ResNet. *Electric Power Syst. Res.* 2023;216(3):109057. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.109057>
29. Zhang D., Sun W., Dai Y., Liu K., Li W., Wang C. A hierarchical early kick detection method using a cascaded GRU network. *Geoenergy Sci. Eng.* 2023;222(3):211390. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2022.211390>
30. Грамович Я.В., Мусатов Д.Ю., Петрусевич Д.А. Применение беггинга в прогнозировании временных рядов. *Russ. Technol. J.* 2024;12(1):101–110. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-101-110>
[Gramovich I.V., Musatov D.Yu., Petrusевич D.A. Implementation of bagging in time series forecasting. *Russ. Technol. J.* 2024;12(1):101–110 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-101-110>]
31. McLeod A., Li W. Diagnostic checking ARMA time series models using squared residual autocorrelations. *J. Time Ser. Anal.* 1983;4(4):269–273. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9892.1983.tb00373.x>

Об авторах

Пашшоев Бахтиёржон, студент, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bahtiyorposhshoev@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0000-2019-2642>

Петрусевич Денис Андреевич, к.ф.-м.н., доцент, кафедра высшей математики, Институт искусственного интеллекта, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: petrusевич@mirea.ru, petrdenis@mail.ru. Scopus Author ID 55900513600, ResearcherID AAA-6661-2020, SPIN-код РИНЦ 7999-6345, <https://orcid.org/0000-0001-5325-6198>

About the authors

Bakhtierzhon Pashshoev, Student, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bahtiyorposhshoev@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0000-2019-2642>

Denis A. Petrusевич, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Higher Mathematics Department, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: petrusевич@mirea.ru, petrdenis@mail.ru. Scopus Author ID 55900513600, ResearcherID AAA-6661-2020, RSCI SPIN-code 7999-6345, <https://orcid.org/0000-0001-5325-6198>

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический университет».

119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Подписано в печать 30.07.2024 г.

Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.

Уч.-изд. листов 14.5.

Тираж 100 экз. Заказ № 1407.

Подписку на печатную версию

Russian Technological Journal можно оформить через ООО «Агентство «Книга-Сервис», www.akc.ru.

Подписной индекс: **79641**.

Printed in MIREA – Russian Technological University. 78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russian Federation.

Signed to print July 30, 2024.

Format 60 × 90/8. Digital print.

C.p.l. 14.5.

100 copies. Order No. 1407.

Subscription to the *Russian Technological Journal* printed version can be made through the *Kniga-Servis* Agency, www.akc.ru.

Subscription index: **79641**.

