

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

12+

www.rtg-mirea.ru



11(6) 2023



ISSN 2782-3210 (Print)
ISSN 2500-316X (Online)

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
2023, том 11, № 6

Russian Technological Journal
2023, Vol. 11, No. 6

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



Russian Technological Journal 2023, том 11, № 6

Дата опубликования 30 ноября 2023 г.

Научно-технический рецензируемый журнал освещает вопросы комплексного развития радио-технических, 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 (ПТУ 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 2023, Vol. 11, No. 6

Publication date November 30, 2023.

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	хабилированный доктор наук, профессор, проректор Вильнюсского университета, Вильнюс, Литва. Scopus Author ID 7003687871, juras.banyas@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, заведующий кафедрой интеллектуальных технологий и систем 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, директор 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, 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, Head of the Department of Intelligent Technologies and Systems, 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, Director 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** *С.М. Иванова, З.В. Ильиченкова*
Формирование клавиатурного почерка при аутентификации на мобильных устройствах

Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования неразрушающего контроля

- 16** *В.В. Голубов, С.В. Манько*
Особенности и перспективы применения метода поисковых случайных деревьев для планирования перемещений автономных роботов

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

- 28** *В.К. Битюков, А.В. Долматов, А.А. Заdernовский, А.И. Стариковский, Р.М. Увайсов*
Расчет допустимых отклонений виброускорений печатных узлов методом имитационного моделирования
- 39** *Г.В. Куликов, Ю.А. Полевода, М.С. Костин*
Использование пространственно-распределенной синфазной антенны для повышения помехоустойчивости приема сигналов

Математическое моделирование

- 47** *С.Ю. Горчаков*
Математическое моделирование полей скоростей и ускорений движения изображения в оптической аппаратуре спутника дистанционного зондирования Земли
- 57** *А.В. Смирнов*
Исследование влияния степени овражности целевой функции на погрешность определения координат ее минимума
- 68** *Д.А. Хрычев*
Свойства определителя Вронского системы решений линейного однородного уравнения: случай, когда число решений меньше порядка уравнения

Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств.

Управление в организационных системах

- 76** *М.А. Абдулкадыров, А.Н. Игнатов, Н.Н. Куликова, Е.С. Митяков*
Оценка эффектов реализации проектов развития производственной системы (на примере АО «Лыткаринский завод оптического стекла»)

Мировоззренческие основы технологии и общества

- 89** *С.И. Довгучиц*
Семантические особенности сложных техносоциальных систем: к вопросу о таксономии технологического пакета искусственного интеллекта

Геоинформатика

- 99** *Ю.В. Бельшева, Д.Д. Сутягин, Э.С. Зимина*
Об архитектуре распределенной геоинформационной технологии мониторинга снежного покрова, функционирующей в обстоятельствах ограниченной телекоммуникационной доступности

Contents

Information systems. Computer sciences. Issues of information security

- 7** *Svetlana M. Ivanova, Zoya V. Ilyichenkova*
Generation of keyboard handwriting during user authentication on mobile devices

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

- 16** *Vladimir V. Golubov, Sergey V. Manko*
Features and perspectives of application of the rapidly exploring random tree method for motion planning of autonomous robotic manipulators

Modern radio engineering and telecommunication systems

- 28** *Vladimir K. Bityukov, Aleksey V. Dolmatov, Anatoly A. Zadernovsky, Anatoly I. Starikovskiy, Ruslan M. Uvaysov*
Calculating permissible deviations of vibration accelerations of printed circuit assemblies by simulation modeling
- 39** *Gennady V. Kulikov, Yuriy A. Polevoda, Mikhail S. Kostin*
Use of a spatially distributed in-phase antenna to increase the noise immunity of signal reception

Mathematical modeling

- 47** *Sergei Yu. Gorchakov*
Mathematical modeling of velocity and accelerations fields of image motion in the optical equipment of the Earth remote sensing satellite
- 57** *Alexander V. Smirnov*
Investigation of influence of objective function valley ratio on the determination error of its minimum coordinates
- 68** *Dmitry A. Khrychev*
Properties of the Wronskian determinant of a system of solutions to a linear homogeneous equation: The case when the number of solutions is less than the order of the equation

Economics of knowledge-intensive and high-tech enterprises and industries. Management in organizational systems

- 76** *Magomed A. Abdulkadyrov, Alexander N. Ignatov, Natalia N. Kulikova, Evgeniy S. Mityakov*
Assessment of the effects of production system development projects: Case study of Lytkarino Optical Glass Factory

Philosophical foundations of technology and society

- 89** *Sergey I. Dovguchits*
Semantic features of complex technosocial systems: On the taxonomy of artificial intelligence technological packages

Geoinformatics

- 99** *Yulia V. Belysheva, Daniil D. Sutyagin, Elizabet S. Zimina*
Architecture of distributed geoinformation technology for snow cover monitoring in circumstances of limited telecommunications accessibility

УДК 004.056.2
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-7-15>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Формирование клавиатурного почерка при аутентификации на мобильных устройствах

С.М. Иванова,
З.В. Ильиченкова @

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

Резюме

Цели. В статье рассматривается новый способ формирования клавиатурного почерка при использовании сенсорной клавиатуры для аутентификации в существующих на данный момент мобильных системах.

Методы. В силу недостаточной надежности отдельно взятой парольной аутентификации предлагается использовать ее комбинацию с характеристиками, которые соответствуют почерку на мобильных устройствах. В статье продемонстрирована возможность использования индивидуальных характеристик пользователя при формировании клавиатурного почерка на устройствах с сенсорной клавиатурой. Показано, что тип используемой клавиатуры влияет на характеристики клавиатурного почерка, поэтому данный аспект можно использовать для повышения надежности парольной аутентификации. Предлагается дополнить процесс аутентификации в информационной среде данными о характере воздействия на сенсорную клавиатуру. Интерес представляет использование встроенной функции 3D Touch, которая доступна при работе на мобильных устройствах и технике, оснащенной сенсорной клавиатурой. В статье продемонстрировано, что использования только одного параметра недостаточно для точной аутентификации. Предложен способ определения допустимого диапазона погрешности, в который должны укладываться как сила нажатия, так и промежуточный интервал при проведении аутентификации. Для этого используется функция Лапласа, позволяющая сформировать интервал каждой характеристики в зависимости от требуемой вероятности распознавания пользователя.

Результаты. Показано, что силы нажатия и промежуточного интервала достаточно для получения необходимых характеристик, позволяющих сформировать уточненный портрет пользователя по его клавиатурному почерку. Приведены экспериментальные статистические данные отдельно среднего выборки для трех различных пользователей согласно силе нажатия, а также результаты аутентификации при использовании одновременно среднеквадратичных отклонений силы нажатий и интервалов между ними при использовании сенсорной клавиатуры для платформы iOSXcode.

Выводы. Сделан вывод о возможности применения способа аутентификации пользователей по клавиатурному почерку, сформированному на основе одновременно силы нажатий на символы клавиатуры и интервалов между нажатиями. Использование значений среднего выборки и среднеквадратичных отклонений позволяет проводить аутентификацию согласно требуемой вероятности распознавания.

Ключевые слова: аутентификация, мобильное устройство, клавиатурный почерк, сила нажатия, временной интервал между нажатиями

• Поступила: 24.04.2023 • Доработана: 22.06.2023 • Принята к опубликованию: 04.09.2023

Для цитирования: Иванова С.М., Ильиченкова З.В. Формирование клавиатурного почерка при аутентификации на мобильных устройствах. *Russ. Technol. J.* 2023; 11(6):7–15. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-7-15>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Generation of keyboard handwriting during user authentication on mobile devices

Svetlana M. Ivanova,
Zoya V. Ilyichenkova[@]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: ilyichenkova@mirea.ru

Abstract

Objectives. This article discusses a new way of generating keyboard handwriting using a touch keyboard for authentication in currently existing mobile systems.

Methods. Due to the insufficient reliability of single password authentication, the proposal is to use it in combination with characteristics which correspond to handwriting on mobile devices. This article demonstrates the possibility of using individual user characteristics in the formulation of keyboard handwriting on devices with touch keyboards. The type of keyboard used affects the characteristics of keyboard handwriting, so this aspect can be used to improve password authentication reliability. The authentication process in the information environment can be supplemented with data on the nature of the impact on a touch keyboard. The use of the built-in 3D Touch function is also of interest. This is available when working on mobile devices and appliances equipped with a touch keyboard. The paper demonstrates that the use of one parameter only is insufficient for accurate authentication. The study proposes a method of determining an acceptable error range for both the touch force and the intermediate interval during authentication. For this purpose, the Laplace function which formulates the interval of each characteristic depending on the required probability of user recognition is used.

Results. Touch force and the intermediate interval are sufficient to obtain the necessary characteristics, in order to formulate a refined user portrait depending on the user's keyboard handwriting. Experimental statistics are given separately for an average sample of three different users depending on touch force. They also provide the results of authentication when using both standard deviations of pressing and the intervals when using the touch keyboard for the iOSXcode platform.

Conclusions. The conclusion relates to the possibility of user authentication by keyboard handwriting, formulated on the basis of both the touch force on the keyboard symbols and intervals between pressing. Using the values of the sample mean and standard deviations allows authentication according to the required recognition probability.

Keywords: authentication, mobile devices, keyboard handwriting, touch force, time interval between character clicks

• Submitted: 24.04.2023 • Revised: 22.06.2023 • Accepted: 04.09.2023

For citation: Ivanova S.M., Ilyichenkova Z.V. Generation of keyboard handwriting during user authentication on mobile devices. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):7–15. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-7-15>

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

На сегодняшний день системы аутентификации на мобильных устройствах обычно основаны на знании, которым обладает пользователь (парольная или графическая аутентификация), или на его биометрических характеристиках (аутентификация по отпечатку пальца или лицу) [1, 2]. Однако перечисленные способы, как правило, не позволяют достигнуть требуемой точности и не обладают функционалом настройки необходимого уровня безопасности [3–5]. Также возможны ситуации, когда нет возможности использовать устройство биометрической аутентификации. Например, такие ситуации могут возникать при нахождении человека в нестандартных условиях¹, когда нет возможности поднять смартфон до уровня лица [6, 7]. В связи с этим представляется целесообразным использовать многофакторную аутентификацию с использованием клавиатурного почерка пользователей мобильных устройств. Так как владелец устройства вводит текст регулярно, то почерк может все время оставаться актуальным. Также, при необходимости, это позволяет использовать почерк не только для аутентификации.

Клавиатурный почерк может формироваться на основе использования предпочтений пользователя и современных технологий, доступных для гаджетов указанного типа. К таким технологиям относится технология 3D Touch², в основе которой лежит определение силы нажатия на различные знаки сенсорной клавиатуры [8, 9]. Возможности данной разработки могут использоваться на всех современных устройствах iPhone³ и на большинстве смартфонах. 3D Touch дает возможность персонализировать способ взаимодействия пользователя с устройством.

¹ Голубкова В.Б., Брагинский А.И. *Вопросы теоретической и прикладной информатики: учебное пособие*. М.: МАДИ; 2018. 72 с. [Golubkova V.B., Braginskii A.I. *Issues of theoretical and applied computer science: textbook*. Moscow: MADI; 2018. 72 p. (in Russ.).]

² *What Is 3D Touch and How It Works*. <https://itechguidesad.pages.dev/posts/what-is-3d-touch-and-how-it-works/>. Дата обращения 22.04.2023. / Accessed April 22, 2023.

³ <https://www.apple.com/iphone/>. Дата обращения 22.04.2023. / Accessed April 22, 2023.

Системы формирования и распознавания клавиатурного почерка, как правило, основаны на обработке сигналов программным образом [10–12]. Поэтому способ аутентификации на мобильных устройствах по клавиатурному почерку, основанному, в т.ч. на использовании технологии 3D Touch, является относительно недорогим и хорошо встраиваемым в существующие системы.

Биометрический почерк включает в себя статистическую обработку данных, полученных при вводе пользователем какой-либо фразы [13, 14]. Следует отметить, что при осуществлении парольной аутентификации фраза, вводимая пользователем, как правило, является фиксированной. Однако при примерном совпадении паролей различных пользователей повышается вероятность совпадения клавиатурного почерка, в основе формирования которого лежит длительность нажатия на определенный символ. Как показали исследования, использование только клавиатурного почерка не позволяет гарантировать необходимую достоверность аутентификации [15, 16]. Более того, с повсеместным распространением мобильных устройств длительность нажатия постепенно изменяется, что не позволяет рассматривать этот параметр как определяющий [17].

При установлении клавиатурного почерка пользователя следует принимать во внимание следующие факторы: тождественность смартфона или иного устройства аутентификации, психофизические характеристики состояния владельца устройства в комплексе [18, 19]. Однако если определяются статистические данные почерка для аутентификации на конкретном устройстве, то первый аспект можно не учитывать [20].

ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ О КЛАВИАТУРНОМ ПОЧЕРКЕ

В условиях быстрого развития программного обеспечения при использовании парольной аутентификации интересным представляется включить в рассмотрение такие факторы, как способ взаимодействия пользователя с сенсорной клавиатурой.

Для формирования клавиатурного почерка могут быть использованы следующие характеристики:

скорость и динамика ввода, частота допущенных ошибок, длительность пауз / наложение сигналов, значение 3D Touch при работе с сенсорной клавиатурой.

В мобильных устройствах существует несколько типов сенсорных клавиатур. Чаще всего пользователь использует одну и ту же раскладку, к которой привык. Однако иногда для удобства ввода тип клавиатуры может меняться. В зависимости от типа клавиатуры меняется не столько длительность нажатия на клавиши, сколько интервал между значащими клавишами. При вводе пароля, интервал также меняется, если пользователю приходится переключаться от символьной клавиатуры к цифровой. На мобильных устройствах длительность или сила нажатия на символ могут быть различными при выборе цифр или служебных знаков в зависимости от использования клавиатуры, т.к. их можно выбирать на основной раскладке, удерживая палец, или включать специальный соответствующий набор знаков.

Использование результатов работы механизма 3D Touch позволяет градуировать силу нажатия и определить несколько уровней в соответствии с полученной величиной. Наиболее простой является следующая градация: обычное нажатие и сильное давление. В первом случае предполагается стандартная работа пользователя с экраном мобильного устройства при выполнении действий. Во втором случае имеет место более сильное давление на символы, что приводит к физическому воздействию, сопровождающемуся прогибом стеклянной панели. Для дифференциации данных уровней силы воздействия предусмотрено использование механизма 3D Touch. Для определения силы нажатия можно использовать свойство Force объекта UITouch, которое присутствует у объектов iPhone версии 6 и выше и характеризует силу касания. Свойство MaximumPossibleForce характеризует максимально возможную величину силы касания. Используя оба значения, можно определять относительное значение силы нажатия на символ. Величина 1.0 представляет среднюю силу, определенную системой.

Для повышения надежности парольной фразы при ее составлении требуется использовать не только символы латинского алфавита, но также цифры и служебные символы. В разных мобильных устройствах используются различные типы клавиатур. Однако во всех устройствах специальные символы вынесены в отдельную клавиатуру. Иногда на специальной вкладке находятся и цифровые клавиши. Поэтому силу нажатия на знаки предлагается дополнить информацией о длительности пауз между информационными (входящими в пароль) символами, требующими переключения клавиатуры.

Процесс распознавания пользователя является двухэтапным. Первый этап требуется для исходного

формирования клавиатурного почерка пользователя. Полученные данные используются на следующем этапе для аутентификации. Сочетание двух этапов позволяет сделать вывод о легитимности пользователя или о попытке войти в систему злоумышленником.

В соответствии с вышеизложенным предлагается формировать клавиатурный почерк, взяв в качестве его характеристик среднее выборки и среднеквадратичное отклонение силы нажатия и интервалов между нажатиями на символы. Эта пара статистических данных характеризуется их разнородностью, что позволяет точнее проводить оценку.

На первом этапе каждый пользователь несколько раз вводит парольную фразу, отвечающую требованиям безопасности. Для повышения репрезентативности выборки можно сформулировать дополнительные требования к паролю, включающие не только обобщенные правила, но и определяющие последовательность набора. Например, можно включить необходимость неоднократного переключения от одного типа символов к другому.

В соответствии с выбранными параметрами требуемые характеристики вычисляются посимвольно и группируются (табл. 1, 2).

Таблица 1. Формат представления данных о силе нажатия на символы

Символ (x_i)	Среднее выборки ($\bar{x}$)	Среднеквадратичное отклонение (σ_x)
...	...	...

Таблица 2. Формат представления данных об интервалах между нажатиями на символы

Последовательные символы (x_i)	Среднее выборки ($\bar{x}$)	Среднеквадратичное отклонение (σ_x)
...	...	...

Вычисление значений второго и третьего столбцов таблиц осуществляется по формулам:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}},$$

где переменная n показывает, сколько раз была повторена парольная фраза.

Так как при аутентификации полученные данные x_{n+1} будут различаться, требуется определить возможный диапазон значений ($x_{\min}$, $x_{\max}$), попадание в который будет свидетельствовать о легитимности пользователя. При этом удобным является наличие возможности варьировать длину интервала в зависимости от требуемой вероятности возникновения

ошибок. Поэтому представляется целесообразным при определении границ интервала учитывать значение среднеквадратичного отклонения:

$$P(x_{\min} < x_{n+1} < x_{\max}) = \Phi\left(\frac{x_{\max} - \bar{x}}{\sigma_x}\right) - \Phi\left(\frac{\bar{x} - x_{\min}}{\sigma_x}\right),$$

где $\Phi(\cdot)$ – функция Лапласа, а распределение случайной величины x является нормальным.

При аутентификации возможны ошибки первого рода (т.е. легальный пользователь не признается таковым) и второго рода (происходит распознавание злоумышленника как зарегистрированного пользователя). Для снижения ошибок второго рода значение вероятности ошибочного распознавания пользователя будет уменьшаться.

Так как в системах распознавания отклонения от среднего значения в обе стороны равнозначны, то вероятность попадания в требуемый интервал можно записать в виде:

$$P(x_{\min} < x_{n+1} < x_{\max}) = 2\Phi\left(\frac{\bar{x} - x_{\min}}{\sigma_x}\right).$$

Тем самым, значения границ допустимого диапазона можно регулировать в зависимости от допустимости ошибок первого или второго рода.

После формирования клавиатурного почерка аутентификация пользователя происходит посредством ввода пароля. Для новой фразы определяются те же статистические характеристики и проверяется их попадание в заданный интервал. В зависимости от результата принимается решение о легитимности пользователя.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АУТЕНТИФИКАЦИЯ

Для проверки работоспособности предложенного способа контроля пользователя была написана программа для получения информации об интенсивности ввода данных и силе нажатия на символы клавиатуры мобильного устройства. При работе использовалась платформа iOSXcode⁴. Вычисления производились для 10 последовательных вводов, выполненных в одинаковых условиях. Для трех различных пользователей (Польз1, Польз2, Польз3) были рассчитаны соответствующие статистические характеристики для введенных данных «1@35f1» (табл. 3–5). Величина 1.0 силы нажатия представляет среднюю силу, определенную системой.

⁴ Xcode. <https://developer.apple.com/xcode/>. Дата обращения 22.04.2023. / Accessed April 22, 2023.

Таблица 3. Данные о величине силы нажатия на символы (Польз1)

Символ	Среднее выборки	Среднеквадратичное отклонение
1	0.4334	0.034916
@	0.4872	0.033796
3	0.558444	0.033623
5	0.539917	0.033619
f	0.492778	0.031256
1	0.479875	0.018871274

Таблица 4. Данные о величине силы нажатия на символы (Польз2)

Символ	Среднее выборки	Среднеквадратичное отклонение
1	0.35947	0.024012
@	0.460015	0.031145
3	0.501201	0.035001
5	0.54102	0.032115
f	0.402495	0.030598
1	0.483985	0.032012

Таблица 5. Данные о величине силы нажатия на символы (Польз3)

Символ	Среднее выборки	Среднеквадратичное отклонение
1	0.590235	0.034985
@	0.58098	0.032998
3	0.6001	0.025198
5	0.63101	0.028957
f	0.56398	0.032015
1	0.55356	0.030011

Полученные данные о величине силы нажатия на разные символы в виде диаграммы сравнения приведены на рис. 1 для каждого из трех пользователей. Результаты были получены для вероятности распознавания пользователя, равной 0.95.

Согласно этим данным, полученные диапазоны не накладываются друг на друга только для знака «3». Однако выборка по одному символу не может считаться достаточной. Поэтому предлагается добавить к анализу данные, основанные на интервалах между нажатиями значащих символов без учета нажатий переключения типа клавиатуры (табл. 6–8).

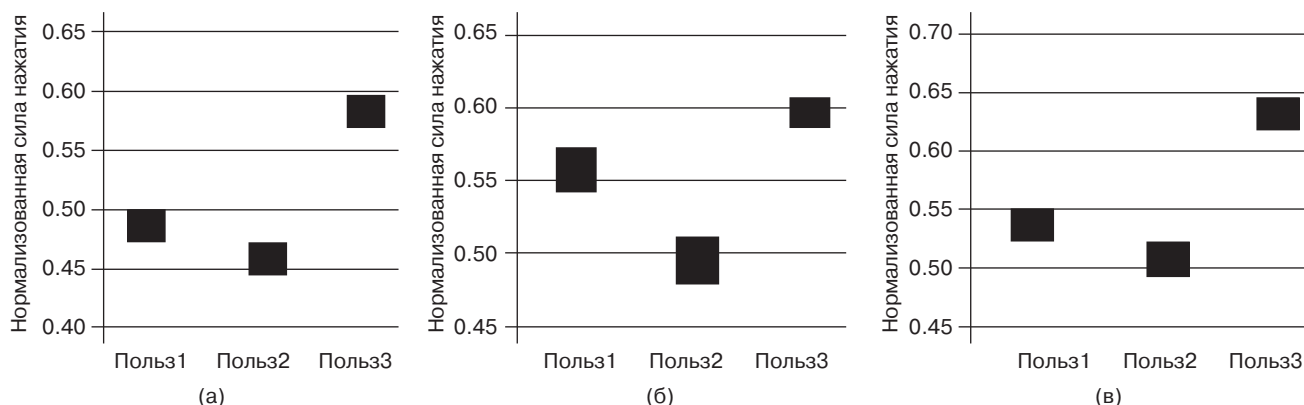


Рис. 1. Допустимые диапазоны силы нажатия:
(а) символ «@», (б) символ «3», (в) символ «5»

Таблица 6. Данные о величине интервала между нажатиями (Польз1)

Последовательные символы	Среднее выборки (10^{-6} , с)	Среднеквадратичное отклонение (10^{-6} , с)
1-@	46915.5	143.2862
@-3	47625.13	141.8598
3-5	46764.5	139.9112
5-f	47696.38	133.5322
f-1	46917.25	118.9138

Таблица 8. Данные о величине интервала между нажатиями (Польз3)

Последовательные символы	Среднее выборки (10^{-6} , с)	Среднеквадратичное отклонение (10^{-6} , с)
1-@	57835.25	152.0627
@-3	67866.13	150.8391
3-5	45906.38	137.8881
5-f	67908	162.6047
f-1	57937.25	104.8996

Таблица 7. Данные о величине интервала между нажатиями (Польз2)

Последовательные символы	Среднее выборки (10^{-6} , с)	Среднеквадратичное отклонение (10^{-6} , с)
1-@	59807.5	181.7389
@-3	69081.63	171.6768
3-5	46779.13	158.8777
5-f	69025.38	106.3336
f-1	59943.13	144.3076

Анализ полученных данных показывает, что временной интервал между нажатием символов, расположенных на одной клавиатуре, также не гарантирует требуемой дифференциации значений (рис. 2в), в то время как переключение клавиатуры с символьной на цифровую (Польз2, Польз3) или выбор цифровых или служебных символов с помощью усиленного нажатия на символы основной клавиатуры (Польз1) позволяет добиться необходимой разницы в характеристиках клавиатурного почерка (рис. 2а, б).

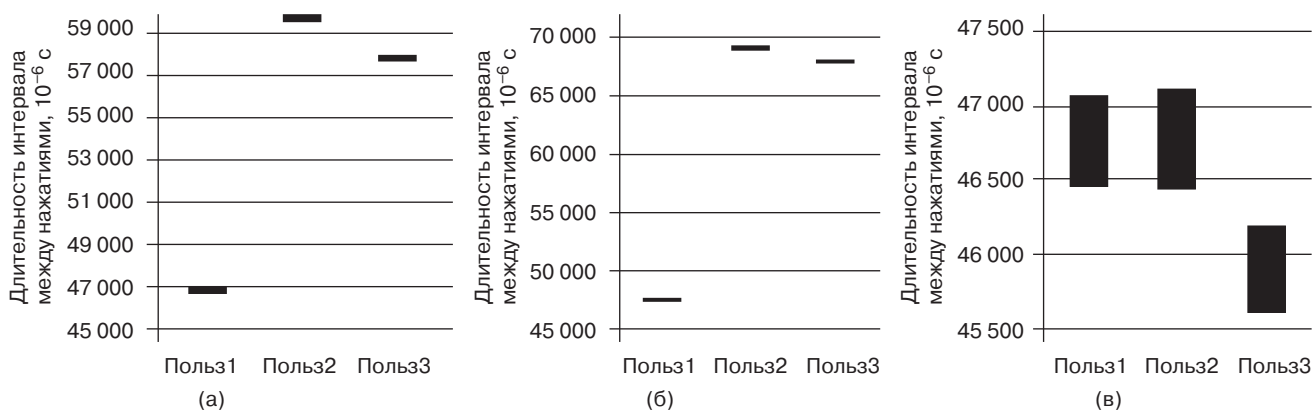


Рис. 2. Допустимые диапазоны интервалов между нажатиями символов
(а) «1-@», (б) «@-3», (в) «3-5»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании парольной аутентификации применение дополнительной информации о клавиатурном почерке, основанном на силе нажатия на клавиши и длительности между последовательными нажатиями, позволяет повысить точность распознавания согласно требуемой вероятности. К достоинствам предложенного метода относится возможность изменения параметров для соблюдения баланса между ошибками первого и второго рода. Получение новой информации в том же формате, в котором находилась исходная информация, позволяет при необходимости обновлять данные для их актуализации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность руководству «МИРЭА – Российский технологический университет» за оказанную помощь в исследованиях.

ACKNOWLEDGMENTS

Authors thank the management of MIREA – Russian Technological University for their assistance in the studies.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ilyichenkova Z.V., Ivanova S.M. Identification of Dynamic Object Parameters. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2003;502(2–3):535–536. [http://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)00493-5](http://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)00493-5)
2. Кхант К.З., Сосенушкин С.Е. Модель анализа больших данных для внедрения умных университетов. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2021;8: 72–75. <http://doi.org/10.37882/2223-2966.2021.08.17>
3. Ilyichenkova Z.V., Ivanova S.M. Cluster keyboard handwriting. *Procedia Computer Science*. 2021;186: 395–402. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.04.162>
4. Горбухов Н.Н., Магомедов Ш.Г. Сравнение конструкторов мобильных приложений. В сб.: *ХРОНИКИ ЦИФРОВЫХ ТРАНСФОРМАЦИЙ: материалы межкафедрального круглого стола*. Выпуск 4. Волгоград. 2022. С. 44–49.
5. Никольский С.Н. Задача автоматизации и эволюционное моделирование. *Школа Науки*. 2022;1(50):3–7. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5914537>
6. Antonova I.I., Antonova A.A., Shmeleva A.N., Novikov A.A., Nazarenko M.A. System Analysis of Transport-Information Infrastructure Transformation in Modern Cities. In: *2020 International Conference Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*. Yaroslavl, Russia. 2020. P. 154–156. <http://dx.doi.org/10.1109/ITQMIS51053.2020.9322902>

Вклад авторов

С.М. Иванова – развитие ключевых целей и задач; проведение исследований, в т.ч. анализ специфики использования мобильных устройств при формировании клавиатурного почерка; разработка математического аппарата анализа данных.

З.В. Ильиченкова – формирование идеи статьи; проведение исследований, в т.ч. анализ возможности использования комбинации нескольких характеристик для формирования клавиатурного почерка; обработка и анализ статистических данных.

Все авторы – написание текста статьи; утверждение окончательного варианта статьи; интерпретация результатов исследования; формулировка выводов.

Authors' contributions

S.M. Ivanova – development of key goals and objectives; conducting research, including analysis of the specifics of using mobile devices in the formation of the keyboard handwriting; development of mathematical apparatus for data analysis.

Z.V. Ilyichenkova – forming an idea for the article; conducting research, including analyzing the possibility of using a combination of several characteristics to form the keyboard handwriting; processing and analyzing of the statistical data.

All authors – writing the text of the article; approval of the final version of the article; interpretation of the research results; formulation of conclusions.

REFERENCES

1. Ilyichenkova Z.V., Ivanova S.M. Identification of Dynamic Object Parameters. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2003;502(2–3):535–536. [http://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)00493-5](http://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)00493-5)
2. Khant K.Z., Sosenushkin S. Big data analysis model for the implementation of smart universities. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series of "Natural and Technical Sciences."* 2021;8: 72–75 (in Russ.). <http://doi.org/10.37882/2223-2966.2021.08.17>
3. Ilyichenkova Z.V., Ivanova S.M. Cluster keyboard handwriting. *Procedia Computer Science*. 2021;186: 395–402. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.04.162>
4. Gorbukhov N.N., Magomedov Sh.G. Comparison of mobile app builders. In: *KhRONIKI TsIFROVYKh TRANSFORMATsII: Materialy mezhkafedral'nogo kruglogo stola (CHRONICLES OF DIGITAL TRANSFORMATIONS. Materials of the Inter-Cathedral Round Table)*. V. 4. Volgograd. 2022. P. 44–49 (in Russ.).
5. Nikolsky S.N. The task of automation and evolutionary modeling. *Shkola Nauki = School of Science*. 2022;1(50):3–7 (in Russ.). <https://doi.org/10.5281/zenodo.5914537>

7. Ермакова А.Ю., Лось А.Б. Об оценке рисков при анализе эффективности алгоритмов защиты информации. *Математическое и компьютерное моделирование в экономике, страховании и управлении рисками*. 2022;7:64–70. URL: <https://www.sgu.ru/sites/default/files/textdocsfiles/2022/12/21/013.pdf>
8. Kuronen T., Eerola T., Lensu L., Kälviäinen H., Häkkinen J. 3D hand movement measurement framework for studying human-computer interaction. In: Arseniev D., Overmeyer L., Kälviäinen H., Katalini B. (Eds.). *Cyber-Physical Systems and Control (CPS&C 2019). Lecture Notes in Networks and Systems*. V. 95. Springer, Cham.; 2019. P. 513–524. http://doi.org/10.1007/978-3-030-34983-7_50
9. Kuronen T., Eerola T., Lensu L., Kälviäinen H. Two-Camera Synchronization and Trajectory Reconstruction for a Touch Screen Usability Experiment. In: Blanc-Talon J., Helbert D., Philips W., Popescu D., Scheunders P. (Eds.). *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems. ACIVS 2018. Lecture Notes in Computer Science*. V. 11182. Springer, Cham.; 2018. P. 125–136. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01449-0_11
10. Stroganov D.V., Sakun B.V., Yartsev M.I. General Principles of Assessment of Staff Skills Building Specialties. *Int. J. Adv. Studies*. 2016;6(4):63–76. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2016-4-63-76>
11. Volkov A.I., Semin V.G., Semin V.V. Fuzzy sets in the problems of assessing the quality of mobile applications. In: *2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*. Yaroslavl, Russia. 2021. P. 355–358. <https://doi.org/10.1109/ITQMIS53292.2021.9642873>
12. Иванова С.М., Ильиченкова З.В., Антонова А.А. Анализ клавиатурного почерка в обучающих системах. *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2020;17;6(192):22–30. <https://doi.org/10.14489/vkit.2020.06.pp.022-030>
13. Алешникова Е.А., Чащина Ю.А. Аксиологизация работы с текстом на уроках русского языка в старшей школе. *Русский язык в школе*. 2019;80(1):46–49. <https://doi.org/10.30515/0131-6141-2019-80-1-46-49>
14. Саркисова И.О., Лаврычев М.А. Анализ влияния расположения NFC меток на приоритет чтения. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2022;8: 119–124. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49623257>
15. Pronin C.B., Maksimych O.I., Ostroukh A.V., Volosova A.V., Matukhina E.N. Creating quantum circuits for training perceptron neural networks on the principles of Grover's algorithm. In: *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. Moscow, Russia. 2022. 5 p. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF53456.2022.9744279>
16. Иванова С.М., Ильиченкова З.В., Антонова А.А. Проверка подлинности пользователя при работе в обучающих системах. *Информационные технологии*. 2020;26(11): 648–654. <https://doi.org/10.17587/it.26.648-654>
17. Матюхин Б.Н., Матюхина Е.Н., Чистякова М.А., Морозов Е.А. Математические модели объектов диагноза. *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2021;5:29–32. <https://doi.org/10.25791/asu.5.2021.1280>
6. Antonova I.I., Antonova A.A., Shmeleva A.N., Novikov A.A., Nazarenko M.A. System Analysis of Transport-Information Infrastructure Transformation in Modern Cities. In: *2020 International Conference Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*. Yaroslavl, Russia. 2020. P. 154–156. <http://dx.doi.org/10.1109/ITQMIS51053.2020.9322902>
7. Ermakova A.Y., Los A.B. On risk assessment when analyzing the effectiveness of information protection algorithms. *Matematicheskoe i komp'yuternoe modelirovanie v ekonomike, strakhovanii i upravlenii riskami = Mathematical and Computer Modeling in Economics, Insurance and Risk Management*. 2022;7: 64–70 (in Russ.). Available from URL: <https://www.sgu.ru/sites/default/files/textdocsfiles/2022/12/21/013.pdf>
8. Kuronen T., Eerola T., Lensu L., Kälviäinen H., Häkkinen J. 3D hand movement measurement framework for studying human-computer interaction. In: Arseniev D., Overmeyer L., Kälviäinen H., Katalini B. (Eds.). *Cyber-Physical Systems and Control (CPS&C 2019). Lecture Notes in Networks and Systems*. V. 95. Springer, Cham.; 2019. P. 513–524. http://doi.org/10.1007/978-3-030-34983-7_50
9. Kuronen T., Eerola T., Lensu L., Kälviäinen H. Two-Camera Synchronization and Trajectory Reconstruction for a Touch Screen Usability Experiment. In: Blanc-Talon J., Helbert D., Philips W., Popescu D., Scheunders P. (Eds.). *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems (ACIVS 2018). Lecture Notes in Computer Science*. V. 11182. Springer, Cham.; 2018. P. 125–136. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01449-0_11
10. Stroganov D.V., Sakun B.V., Yartsev M.I. General Principles of Assessment of Staff Skills Building Specialties. *Int. J. Adv. Studies*. 2016;6(4):63–76. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2016-4-63-76>
11. Volkov A.I., Semin V.G., Semin V.V. Fuzzy sets in the problems of assessing the quality of mobile applications. In: *2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*. Yaroslavl, Russia. 2021. P. 355–358. <https://doi.org/10.1109/ITQMIS53292.2021.9642873>
12. Ivanova S.M., Ilyichenkova Z.V., Antonova A.A. Keyboard handwriting analysis in the learning systems. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Herald of Computer and Information Echnologies*. 2020;17;6(192):22–30 (in Russ.). <https://doi.org/10.14489/vkit.2020.06.pp.022-030>
13. Aleshnikova E.A., Chadina Yu.A. The Axiological Approach in Teaching High School Students Reading Comprehension at Russian Language Lessons. *Russkii yazyk v shkole = Russian Language at School*. 2019;80(1):46–49 (in Russ.). <https://doi.org/10.30515/0131-6141-2019-80-1-46-49>
14. Sarkisova I.O., Laverychev M.A. Analysis of the influence of the location of NFC tags on the occurrence of collisions. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series of "Natural and Technical Sciences."* 2022;8:119–124 (in Russ.). Available from URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49623257>

18. Каримов М.Т., Никонов В.В. Сравнение производительности моделей сверточных нейронных сетей на графическом процессоре. *Информационные и телекоммуникационные технологии*. 2021;52:42–48.
19. Савиных В.П., Господинов С.Г., Кудж С.А., Цветков В.Я., Дешко И.П. Семантика визуальных моделей в космических исследованиях. *Russian Technological Journal*. 2022;10;2(46):51–58. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-51-58>
20. Чекушин А.В., Котилевец И.Д., Иванова И.А., Чистякова М.А. Обработка аппаратных прерываний на примере микроконтроллера ATMEGA16. *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2022;1:33–39. <http://doi.org/10.25791/asu.1.2022.1341>
15. Pronin C.B., Maksimych O.I., Ostroukh A.V., Volosova A.V., Matukhina E.N. Creating quantum circuits for training perceptron neural networks on the principles of Grover's algorithm. In: *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. Moscow, Russia. 2022. 5 p. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF53456.2022.9744279>
16. Ivanova S.M., Ilyichenkova Z.V., Antonova A.A. User Authentication in Training Systems. *Informacionnye tekhnologii = Information Technologies*. 2020;26(11): 648–654 (in Russ.). <https://doi.org/10.17587/it.26.648-654>
17. Matyukhin B.N., Matyukhina E.N., Chistyakova M.A., Morozov E.A. Mathematical models of objects of diagnosis. *Promyshlennye ASU i kontroly = Industrial Automatic Control Systems and Controllers*. 2021;5: 29–32 (in Russ.). <https://doi.org/10.25791/asu.5.2021.1280>
18. Karimov M.T., Nikonov V.V. Performance comparison of convolutional neural network models on a GPU. *Informatsionnye i telekommunikatsionnye tekhnologii = Information and Telecommunication Technologies*. 2021;52:42–48 (in Russ.).
19. Savinykh V.P., Gospodinov S.G., Kudzh S.A., Tsvetkov V.Ya., Deshko I.P. Semantics of visual models in space research. *Russ. Technol. J.* 2022;10;2(46):51–58 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-51-58>
20. Chekushin A.V., Kotilevets I.D., Ivanova I.A., Chistyakova M.A. Handling hardware interrupts using the ATmega16 microcontroller as an example. *Promyshlennye ASU i kontroly = Industrial Automatic Control Systems and Controllers*. 2022;1:33–39 (in Russ.). <https://doi.org/10.25791/asu.1.2022.1341>

Об авторах

Иванова Светлана Михайловна, к.т.н., доцент, кафедра КБ-14 «Цифровые технологии обработки данных» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ivanova_s@mirea.ru. Scopus Author ID 36935727700, SPIN-код РИНЦ 4063-4665, <http://orcid.org/0000-0003-3366-3233>

Ильиченкова Зоя Викторовна, к.т.н., доцент, кафедра КБ-14 «Цифровые технологии обработки данных» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ilichenkova@mirea.ru. Scopus Author ID 6505467030, SPIN-код РИНЦ 4652-0380, <http://orcid.org/0000-0003-2776-5364>

About the authors

Svetlana M. Ivanova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Digital Data Processing Technologies, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ivanova_s@mirea.ru. Scopus Author ID 36935727700, RSCI SPIN-code 4063-4665, <http://orcid.org/0000-0003-3366-3233>

Zoya V. Ilyichenkova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Digital Data Processing Technologies, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ilichenkova@mirea.ru. Scopus Author ID 6505467030, RSCI SPIN-code 4652-0380, <http://orcid.org/0000-0003-2776-5364>

Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования
неразрушающего контроля

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

УДК 007.52; 629.3.05; 004.021
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-16-27>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Особенности и перспективы применения метода поисковых случайных деревьев для планирования перемещений автономных роботов

В.В. Голубов [@],
С.В. Манько

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

Резюме

Цели. Статья посвящена анализу особенностей одного из наиболее многообещающих подходов к решению задач планирования перемещений автономных роботов различных типов и назначения с помощью метода поисковых случайных деревьев. Показано, что развитие современной робототехники неразрывно сопряжено с совершенствованием конструкций создаваемых образцов, для которых размещение манипулятора на подвижной платформе становится типовым вариантом компоновки. Целью работы является оценка перспектив использования метода поисковых случайных деревьев в качестве конструктивной основы для создания универсального планировщика перемещений мобильных и манипуляционных роботов, включая автономные робототехнические системы с манипулятором на подвижной платформе.

Методы. Объектом проводимых исследований является метод поисковых случайных деревьев RRT (rapidly exploring random trees) и его известные модификации RRT* и RRT-Connect. Оценка эффективности их прикладного применения для решения задач планирования перемещений роботов различных типов проводилась с помощью методов компьютерного и натурного моделирования.

Результаты. На основе обзора литературы и по итогам проведенных исследований показано, что широкие возможности метода поисковых случайных деревьев позволяют обеспечить решение задач планирования перемещений не только для мобильных и манипуляционных роботов, но и для робототехнических систем с размещением бортового манипулятора (в т.ч. с избыточной или реконфигурируемой структурой) на транспортной платформе. Эффективность прикладного применения метода поисковых случайных деревьев подтверждается примерами моделирования мобильной платформы с бортовым манипулятором и результатами натурных экспериментов с опытным образцом реконфигурируемого мехатронно-модульного робота «АРАКС» (РТУ МИРЭА, Россия). Экспериментально установлено и теоретически обосновано, что конечная размерность дерева поиска, а, следовательно, и время его построения, вплоть до достижения заданного целевого состояния, во многом определяются величиной фактора роста.

Выводы. Обобщение полученных результатов открывает реальные перспективы использования метода поисковых случайных деревьев в качестве конструктивной основы не только для создания универсальных средств планирования перемещений мобильных робототехнических систем с бортовым манипулятором, но и для решения задач автоматизации стыковки автономных подвижных платформ.

Ключевые слова: автономный робот, интеллектуальное управление, реконфигурируемый робот, изменяемая кинематическая структура, метод поисковых случайных деревьев

• Поступила: 17.02.2023 • Доработана: 29.03.2023 • Принята к опубликованию: 05.09.2023

Для цитирования: Голубов В.В., Манько С.В. Особенности и перспективы применения метода поисковых случайных деревьев для планирования перемещений автономных роботов. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):16–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-16-27>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Features and perspectives of application of the rapidly exploring random tree method for motion planning of autonomous robotic manipulators

Vladimir V. Golubov[@],
Sergey V. Manko

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: golubov@mirea.ru

Abstract

Objectives. The work analyzes features of one of the most promising approaches to solve the problems for motion planning of autonomous robotic manipulators of various types and purposes using the rapidly exploring random tree (RRT) method. The development of modern robotics is shown to be inextricably linked with the improvement of the designs of the created samples, for which the placement of a manipulator on platform becomes a typical layout option. Prospects for using the RRT method as a constructive basis for creating a universal motion planner are evaluated for mobile and robotic manipulators, including autonomous robotic systems with a manipulator on a moving platform.

Methods. The object of the research is the RRT method and its well-known modifications RRT* and RRT-Connect. The effectiveness of applying such methods for solving problems associated with planning the motions of robotic manipulators of various types was evaluated using computer and natural simulation methods.

Results. Based on a review of the literature and the results of the research, the wide possibilities of the RRT method can be used for solving motion planning problems not only for mobile and robotic manipulators, but also for robotic systems on whose transport platform an onboard manipulator has been installed (including those having a redundant or reconfigurable structure). The effectiveness of the applied application of the RRT method is confirmed by examples of modeling a mobile platform with an onboard manipulator and the results of full-scale experiments with a prototype of the ARAKS reconfigurable mechatronic-modular robotic manipulators (RTU MIREA, Russia). It can be experimentally demonstrated and theoretically substantiated that the final dimension of the exploring tree, and hence the time of its construction up to reaching a given target state, is largely determined by the value of the growth factor.

Conclusions. The generalization of the results obtained opens up real prospects for using the RRT method as a constructive basis not only for creating universal means for motion planning mobile robotic systems with an onboard manipulator, but also for solving the problems of automating the docking of autonomous mobile platforms.

Keywords: autonomous robotic manipulator, intelligent control, reconfigurable robotic manipulator, variable kinematic structure, rapidly exploring random tree method

• Submitted: 17.02.2023 • Revised: 29.03.2023 • Accepted: 05.09.2023

For citation: Golubov V.V., Manko S.V. Features and perspectives of application of the rapidly exploring random tree method for motion planning of autonomous robotic manipulators. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):16–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-16-27>

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

Перспективные образцы полуавтоматических и автономных роботов, создаваемых для работы в условиях неопределенности, должны обладать широким набором функциональных возможностей анализа сенсорной информации, оценки окружающей обстановки, планирования целесообразных действий и их последующей отработки.

В числе возникающих проблем одна из наиболее острых связана с разработкой принципов построения и состава программно-алгоритмических средств для решения задач планирования перемещений и управления движением роботов различных типов и компоновок с учетом множества ограничений, определяемых видом формируемых траекторий, характером внешней среды, особенностями рабочей сцены и другими факторами. Исследования, активно проводимые в этой области с начала 60-х годов XX века, позволяют обеспечить последовательное накопление теоретических и прикладных заделов, которые в тех или иных сочетаниях находят свое практическое применение в современных системах управления роботами.

Тем не менее, поиск путей повышения эффективности программно-алгоритмических средств построения маршрутов целенаправленного перемещения и планирования движений автономных роботов продолжает сохранять свою актуальность.

Необходимо отметить, что развитие робототехники, расширение областей ее прикладного применения и спектра решаемых задач неразрывно сопряжено с совершенствованием создаваемых образцов, повышением уровня их функциональных возможностей и, с другой стороны, с усложнением конструктивных компоновок, как неизбежным следствием.

Так, в частности, для роботов специального и промышленного назначения размещение многофункционального манипулятора на мобильной платформе стало одной из типовых схем построения (рис. 1).

Иллюстрацией другого типа могут служить мехатронно-модульные роботы, способные автоматически трансформировать свою структуру с переходом от конфигурации подвижной платформы к конфигурации мобильного манипулятора, как показано на рис. 2.

В этой связи особый интерес представляет метод поисковых случайных деревьев (rapidly exploring

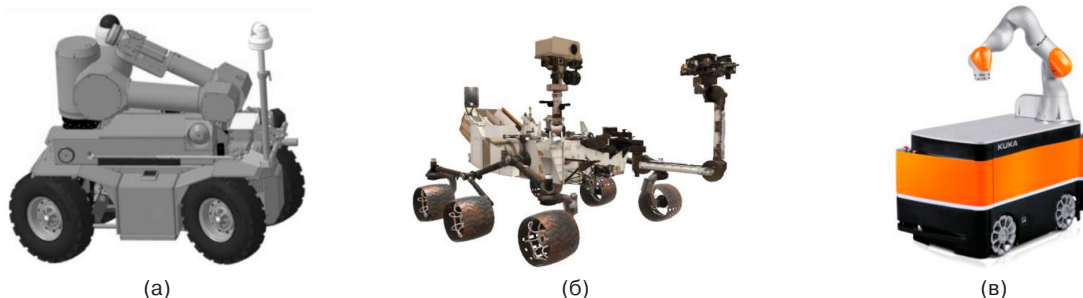


Рис. 1. Автономные роботы специального (а), (б) и промышленного (в) назначения с бортовым манипулятором: (а) автономный робот специального назначения (МГУ им. Н.Э. Баумана, Россия); (б) марсоход «Curiosity» (NASA, США); (в) «KMriiwa» (KUKA Roboter GmbH, Германия)

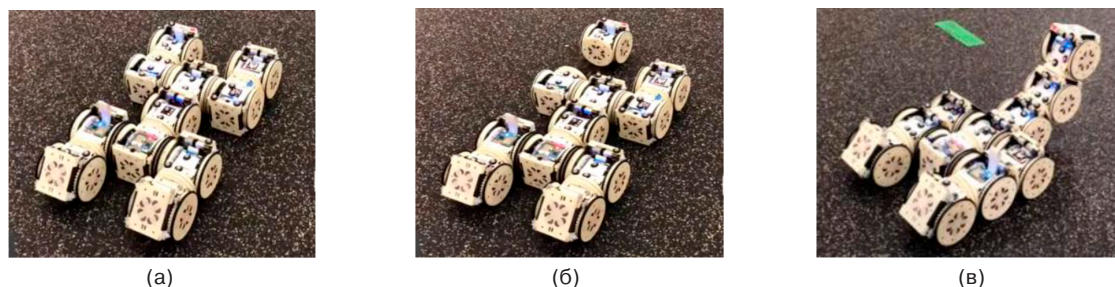


Рис. 2. Автоматическая трансформация мехатронно-модульного робота «SMORES-EP» (University of Pennsylvania, США) из конфигурации подвижной платформы к конфигурации мобильного манипулятора

random tree, RRT) [1, 2], специфические особенности которого открывают перспективы создания универсального планировщика движений для мобильных и манипуляционных роботов, включая робототехнические системы с компоновкой манипулятора на транспортной платформе.

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ И ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПОИСКОВЫХ СЛУЧАЙНЫХ ДЕРЕВЬЕВ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ МОБИЛЬНЫХ И МАНИПУЛЯЦИОННЫХ РОБОТОВ

Использование метода поисковых случайных деревьев RRT [3, 4] предполагает построение маршрута целенаправленного перемещения робота на множестве оперативно формируемых примеров из числа допустимых состояний в пространстве конфигураций. Создаваемое дерево, которое выступает в качестве дискретной реконструкции конфигурационного пространства робота, строится случайным образом из корневой вершины, соответствующей заданному исходному состоянию.

Каждая синтезируемая ветвь дерева определяет возможный переход к одному из новых состояний, генерация которых производится в конфигурационном пространстве с учетом проверки на свою допустимость и продолжается вплоть до достижения целевого положения. В обобщенном виде соответствующий алгоритм описывается последовательностью ряда ключевых шагов.

1. В качестве корневой вершины формируемого дерева T устанавливается точка c_{init} , соответствующая начальному состоянию робота в его конфигурационном пространстве C .
2. В течение априорно заданного числа итераций N или пока не достигнуто целевое состояние c_{goal} выполняется (циклически) следующая последовательность действий:
 - генерация случайной точки $c_{rand} \in C$;
 - отыскание вершины дерева $c_{near} \in T$, которая является ближайшей к выбранной точке c_{rand} (как показано на рис. 3);
 - отыскание точки c' , лежащей на луче $p(c_{near}, c_{rand})$ и отстоящей от вершины c_{near} на удалении Δc (задаваемом параметре роста дерева) (рис. 3):

$$c' : [c_{near}, c'] \in p, \|c_{near}, c'\| = \Delta c;$$

- проверка конфликтности перехода между состояниями c_{near} и c' на предмет попадания в область конфигурационного пространства $C_{obs} \in C$, соответствующую пересечениям с препятствиями с точностью до априорно установленной

величины ϵ , характеризующей погрешность определения конфликта (рис. 4);

- отыскание точки c_{stop} , ближайшей к c_{near} на границе области допустимых состояний $C_{free} = C \setminus C_{obs}$ вдоль луча $p(c_{near}, c_{rand})$ (рис. 4):

$$c_{stop} : [c_{near}, c_{stop}] \in p \cap C_{free}; \|c_{stop}, C_{obs} \cap p\| \leq \epsilon;$$

- отыскание точки c_{new} как нового конфигурационного состояния:

$$c_{new} = \begin{cases} c', [c_{near}, c'] \in C_{free}, \\ c_{stop}, [c_{near}, c'] \notin C_{free}; \end{cases}$$

- обновление дерева с внесением в списки описания его вершин и ветвей новых элементов c_{near} , c_{new} и $[c_{near}, c_{new}]$ соответственно при условии, что $c_{new} \in c_{near}$;
- проверка найденной точки c_{new} на удаленность по отношению к целевой; при выполнении условия $\|c_{new}, c_{goal}\| \leq \delta$ (δ – априорно установленная точность) задача поиска пути считается решенной.

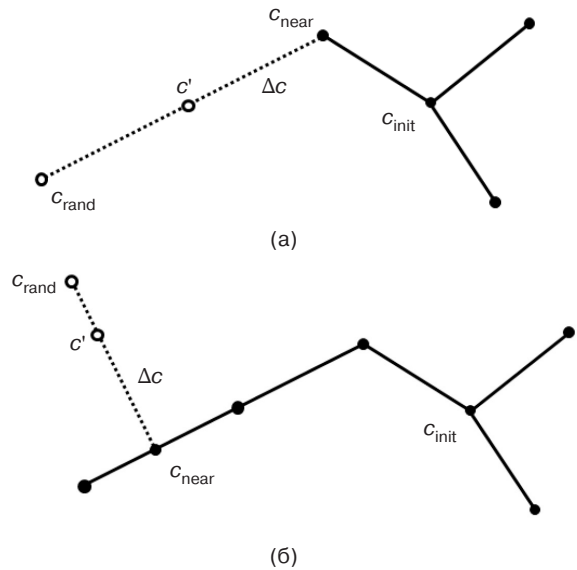


Рис. 3. Варианты отыскания вершины дерева, являющейся ближайшей по отношению к случайно выбранной точке

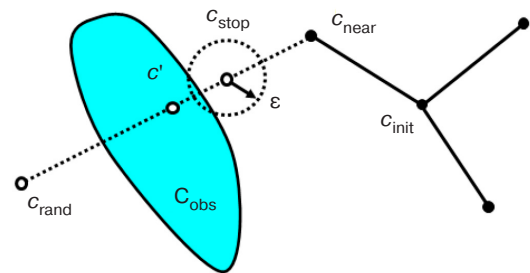


Рис. 4. Проверка конфликтности перехода между смежными конфигурационными состояниями

В процессе построения дерева предпринимаются периодические попытки включения целевой конфигурации в состав его вершин за счет однократного повторения всех действий шага 2 при условии, что $c_{\text{rand}} = c_{\text{goal}}$.

3. Если решение не найдено, то выполняется возврат к шагу 2.

На рис. 5 приведен пример планирования маршрута в двумерном конфигурационном пространстве $C(x, y)$ с помощью метода поисковых случайных деревьев RRT.



Рис. 5. Использование метода поисковых случайных деревьев RRT для планирования маршрута целенаправленного перемещения автономного мобильного робота на автоматически синтезированной карте

В общем случае практическое применение метода поисковых случайных деревьев предполагает привлечение дополнительных процедур сглаживания найденных траекторий.

Следует отметить, что идейная основа и особенности метода обуславливают возможность его использования в решении задач планирования перемещений не только мобильных, но и манипуляционных роботов, в т.ч. обладающих избыточной кинематической структурой [5, 6].

Очевидно, что конечная размерность дерева поиска, а, следовательно, и время его построения, будут во многом зависеть от заданного фактора роста, который по существу характеризует величины приращений координат дочерних точек относительно родительских в конфигурационном пространстве робота. Так, при малых приращениях случайно создаваемые точки будут располагаться достаточно близко друг от друга, определяя соответствующую размерность дерева поиска. С последовательным увеличением приращений удаленность между синтезируемыми точками также будет возрастать, обуславливая повышение скорости распространения ветвей дерева и устойчивое снижение общего количества его вершин, плотность которых обеспечивает

достижение целевого положения. Однако дальнейшее увеличение приращений приводит к постепенному изменению самого характера алгоритма, когда генерация новой точки, осуществляемая в привязке к параметрам родительской, становится по существу эквивалентной выбору случайных координат со значительным разбросом. Соответствующее увеличение протяженности ветвей дерева сопровождается существенным ускорением его роста при пропорциональном снижении плотности покрытия пространства поиска. В связи с этим параметры продолжительности процесса поиска, равно как и конечной размерности дерева, оба из которых определяются тем уровнем плотности покрытия, при котором искомое целевое состояние окажется достижимым, будут неуклонно повышаться. Объективность подобной зависимости конечной размерности дерева поиска от выбора величины случайных приращений координат родительских точек для получения дочерних убедительно подтверждается данными экспериментов, приведенными на рис. 6.

Однако специфика применения метода поисковых случайных деревьев в приложении к манипуляционным роботам сопряжена с необходимостью организации опосредованной проверки отбираемых точек конфигурационного пространства на принадлежность свободным, запретным или целевым областям. Вынужденность подобного подхода обуславливается сложностью отображения особенностей реальной рабочей обстановки в конфигурационном пространстве манипуляционного робота. Поэтому в общем случае оценка той или иной точки конфигурационного пространства предполагает необходимость решения прямой задачи кинематики $X_M = F(c)$ для расчета текущего состояния манипулятора X_M по известным значениям обобщенных координат $c \in (q_1, \dots, q_n)$.

Полученные данные позволяют обеспечить контроль параметров удаленности манипулятора по отношению к объектам внешней среды и заданного целевого положения. В формальной форме записи условия подобной проверки могут быть представлены следующим образом:

$$c \in C_{\text{obs}}, \text{ если } X_{\text{obs}} \cap X_M \neq \emptyset,$$

$$c \in C_{\text{free}}, \text{ если } X_{\text{obs}} \cap X_M = \emptyset,$$

$$c \in C_{\text{goal}}, \text{ если } |X_M - X_{\text{goal}}| < r,$$

где X_M и X_{obs} – геометрические места точек, занимаемых манипулятором, а также объектами внешней среды, выступающими в качестве препятствий; X_{goal} – целевое положение манипулятора; r – априорно установленная точность отработки целевого положения.

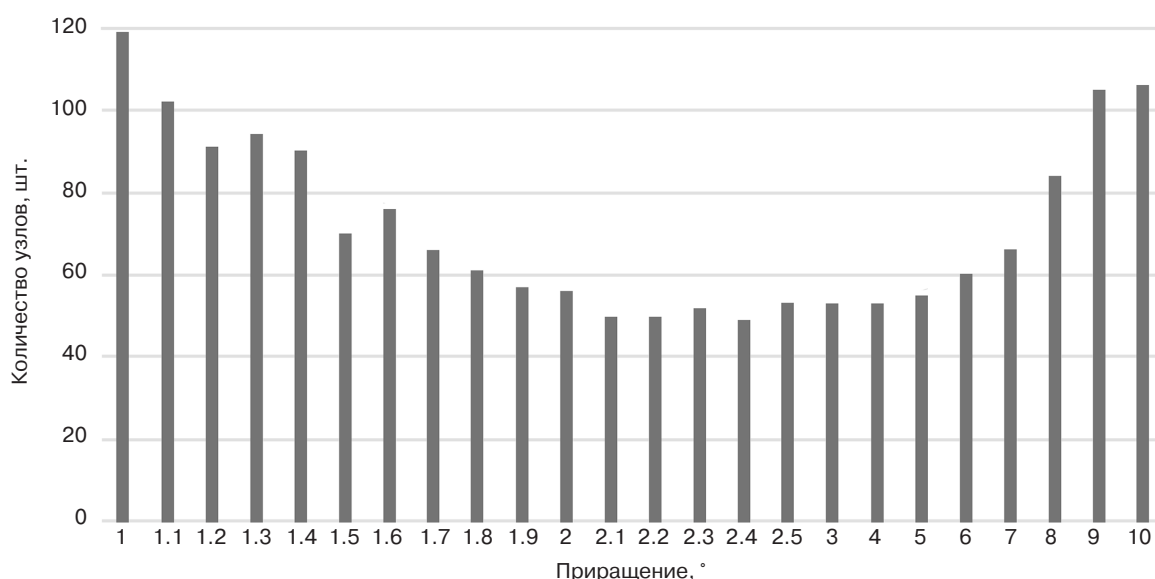


Рис. 6. Изменение размерности дерева поиска в зависимости от величины диапазона случайных приращений координат родительских точек для получения дочерних в конфигурационном пространстве манипулятора

На рис. 7 приведены фрагменты модельных экспериментов по планированию целенаправленных перемещений манипулятора на основе метода поисковых случайных деревьев RRT. Привлечение эвристик, определяющих обоснованный выбор родительских вершин (как, например, ближайших по отношению к целевому состоянию), позволяет существенным образом понизить размерность формируемого дерева (рис. 7б) с одновременным сокращением времени решения задачи.

Инвариантность к размерности конфигурационного пространства, в котором осуществляется поиск необходимых решений, является одним из важнейших достоинств метода поисковых случайных деревьев, открывающих возможности и перспективы его прикладного применения для манипуляторов не только с избыточной, но и изменяемой кинематической структурой.

Так, в частности, результаты моделирования, представленные на рис. 8, со всей очевидностью

подтверждают эффективность применения метода поисковых случайных деревьев на примере планирования целенаправленного перемещения семи-звенного мехатронно-модульного манипуляционного робота в среде с точечным препятствием.

На рис. 9 приведены фрагменты натурных экспериментов по использованию метода поисковых случайных деревьев для планирования перемещений реконфигурируемого манипуляционного робота, когда модификация его кинематической структуры осуществляется за счет автоматической стыковки с дополнительным мехатронным модулем. Данные проведенных исследований являются практическим подтверждением реальности разработки унифицированных средств для планирования перемещений и управления движением манипуляционных роботов с учетом требований по инвариантности к составу и оперативным изменениям имеющейся кинематической структуры.

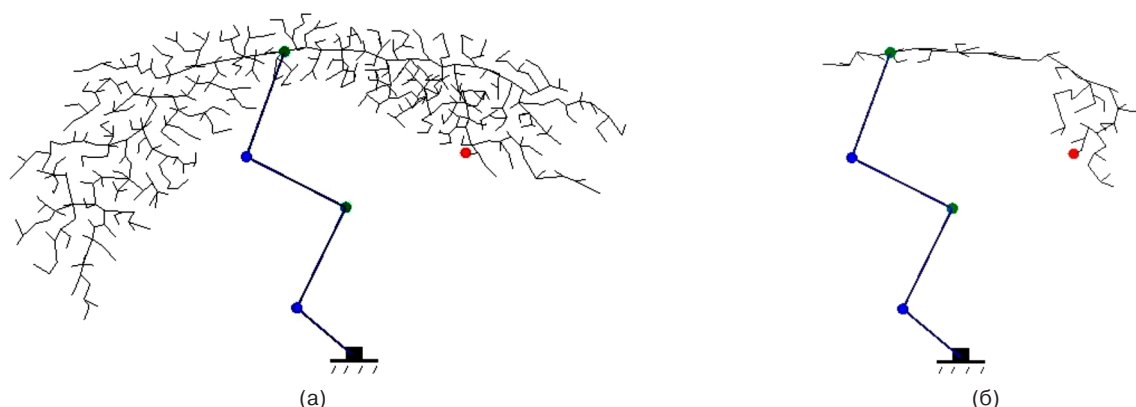


Рис. 7. Фрагменты модельных экспериментов по планированию целенаправленных перемещений манипулятора на основе метода поисковых случайных деревьев: в оригинальном варианте (а); с привлечением эвристики, определяющей обоснованный выбор родительской конфигурации (б)

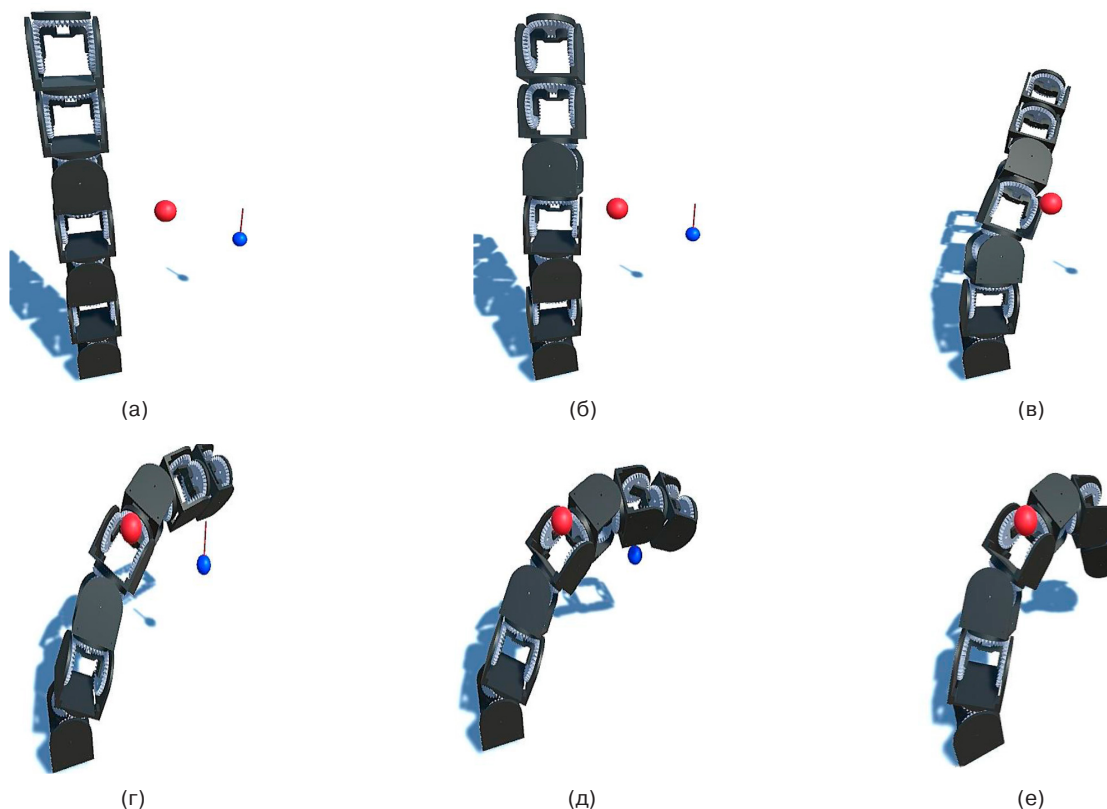


Рис. 8. Фрагменты моделирования целенаправленного перемещения, формируемого на основе метода поисковых случайных деревьев для семизвенного манипулятора в среде с точечным препятствием: уклонение от препятствия при движении к заданному целевому состоянию (а–г); отработка точки требуемого позиционирования с заданным вектором подхода (д–е)

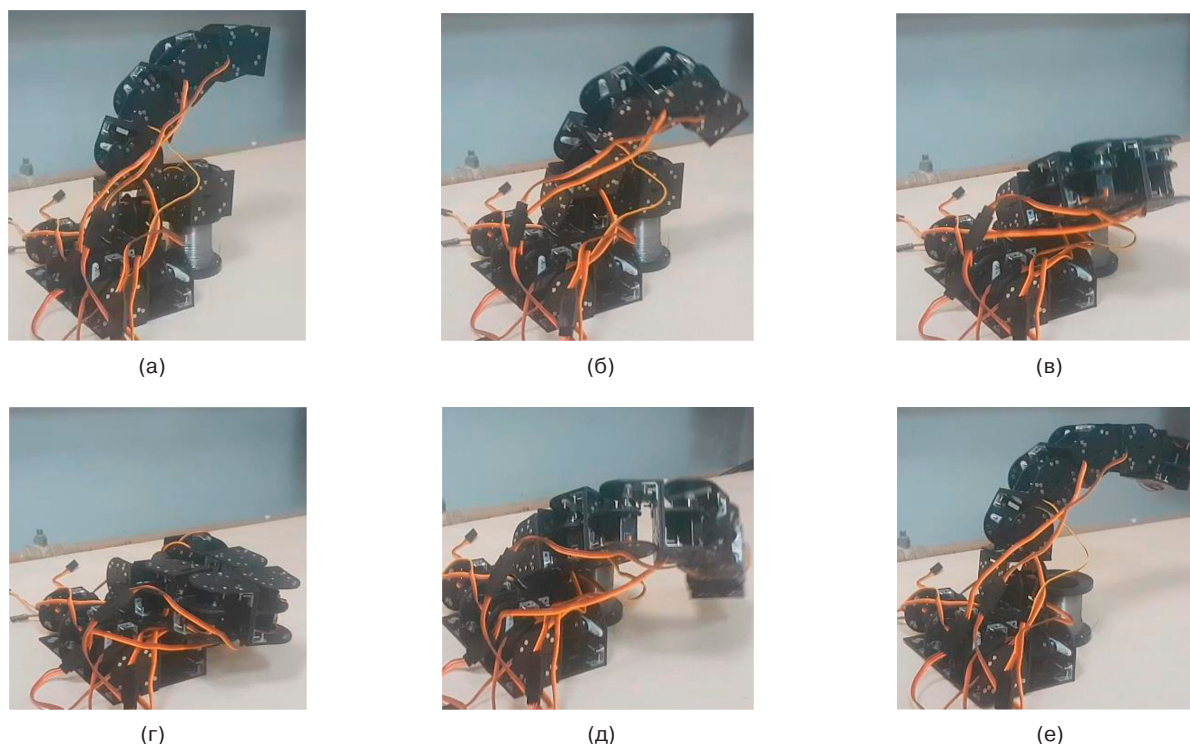


Рис. 9. Фрагменты натурного эксперимента по использованию метода поисковых случайных деревьев для планирования перемещений реконфигурируемого мехатронно-модульного манипуляционного робота «АРАКС» (РТУ МИРЭА, Россия): движение манипулятора к месту проведения стыковки с дополнительным мехатронным модулем (а–в); автоматическая стыковка с дополнительным мехатронным модулем (г); возвратное движение манипулятора с измененной кинематической структурой (д–е)

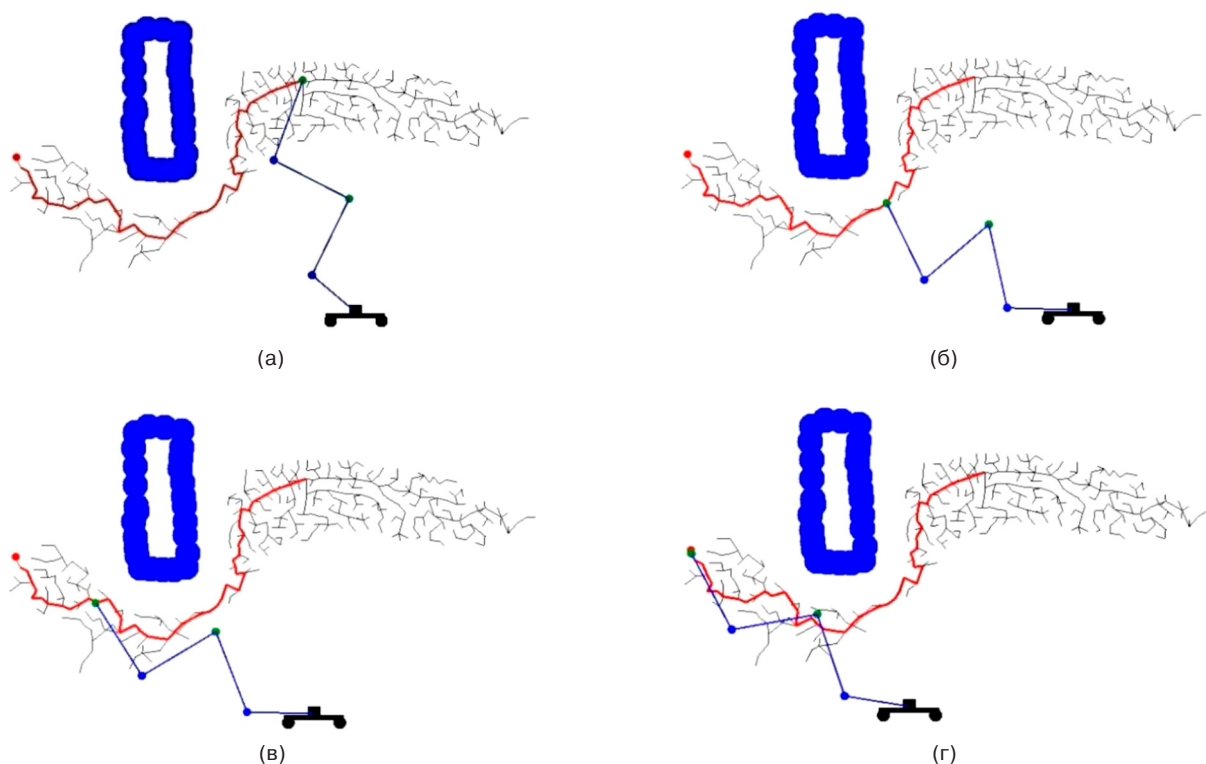


Рис. 10. Использование метода поисковых случайных деревьев для планирования целенаправленных перемещений для манипулятора на мобильном основании

В приложении к специальной робототехнике, многие образцы которой построены по схеме «манипулятор на подвижном основании», применение метода поисковых случайных деревьев представляет особый интерес. Так, например, при автоматическом поиске, захвате и эвакуации объектов целевого интереса задачи планирования перемещений мобильной платформы и манипулятора оказываются тесно взаимосвязанными. Очевидно, что удачный выбор месторасположения платформы будет не только определять характер движения манипулятора, но и обуславливать принципиальную достижимость требуемой точки рабочей сцены с заданными параметрами векторов подхода и ориентации. В частности, как показано на рис. 10, использование метода RRT в своей оригинальной версии обеспечивает возможность планирования перемещений не только для мобильной платформы и манипулятора, рассматриваемых в определенной очередности, но и в случае их представления в общем конфигурационном пространстве в качестве единой системы.

Высокая вычислительная эффективность алгоритмов, реализующих метод поисковых случайных деревьев RRT, позволяет обеспечить решение задач формирования маршрута, не гарантируя, однако, его оптимальности в отношении какого-либо критерия качества. Попытки устранения этого недостатка привели к появлению метода RRT*,

ориентированного на отыскание асимптотически оптимальных решений [7–9]. Ключевые особенности, отличающие метод RRT* от его прототипа, связаны с внесением ряда дополнений и изменений базовых принципов генерации деревьев поиска. Так, в частности, главное нововведение устанавливает понятие стоимости пути в ту или иную вершину дерева.

Отыскание новой вершины c_{new} по ходу построения дерева методом RRT* производится по аналогии с методом RRT. Интеграция найденной вершины c_{new} в состав синтезируемой структуры предполагает выбор такого варианта, при котором стоимость ведущего к ней пути $cost(c_{init}, c_{new})$ по направлению из корневого узла c_{init} имела бы минимальное значение. В этой связи в окрестности с центром в точке c_{new} и заданным радиусом r проводится поиск такой вершины c_{min} , которая отвечает следующему условию:

$$c_{min} = \operatorname{argmin}_{c \in C^*} (cost(c_{init}, c) + cost(c, c_{new})),$$

где C^* – подмножество вершин дерева, лежащих внутри окрестности радиуса r с центром в точке c_{new} .

Вершина c_{new} включается в списки элементов дерева как дочерняя по отношению к вершине c_{min} .

Важно отметить, что величина окрестности, в которой осуществляется поиск, определяется

в зависимости от текущего количества вершин дерева и уменьшается по мере его роста [8]:

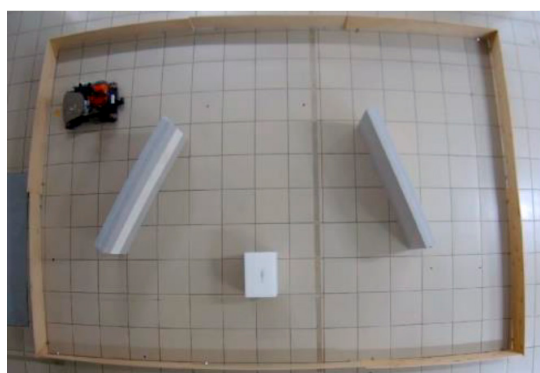
$$r = \gamma(\log(n)/n)^{1/d+1},$$

где d – размерность конфигурационного пространства; n – текущее количество вершин дерева; γ – постоянный коэффициент, определяемый объемом допустимого конфигурационного пространства [7].

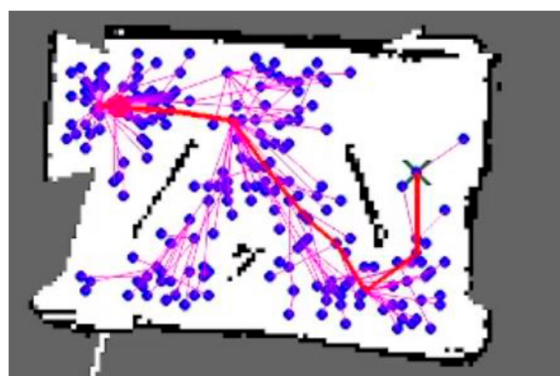
Дальнейшие шаги ставят своей целью локальную оптимизацию структуры дерева в окрестности, выделенной ранее вокруг вершины c_{new} . В рамках их выполнения для каждой вершины $c \in C^*$ анализируется возможность переформирования ведущего к ней пути через вершину c_{new} с учетом фактического изменения стоимости соответствующего маршрута. При снижении величины показателя $\text{cost}(c_{\text{init}}, c)$ производится локальная реструктуризация дерева, при которой рассматриваемая вершина $c \in C^*$ становится дочерней по отношению к c_{new} . Как показано на рис. 11, применение метода RRT* для решения задач планирования перемещений роботов обеспечивает построение значительно более гладких траекторий по сравнению с формируемыми на основе оригинальной версии метода поисковых случайных деревьев.

Незначительные изменения в алгоритмической реализации метода обеспечивают его применимость для решения задач планирования перемещений робота в условиях априорно неизвестных и динамических сцен за счет дополнительных механизмов оперативного перестроения синтезируемого дерева [10–12]. Так, на рис. 12 приведены фрагменты модельных экспериментов по планированию перемещений мобильного робота в условиях априорно неизвестной сцены, когда перестроение дерева поиска осуществляется по мере обнаружения препятствий непосредственно в процессе движения.

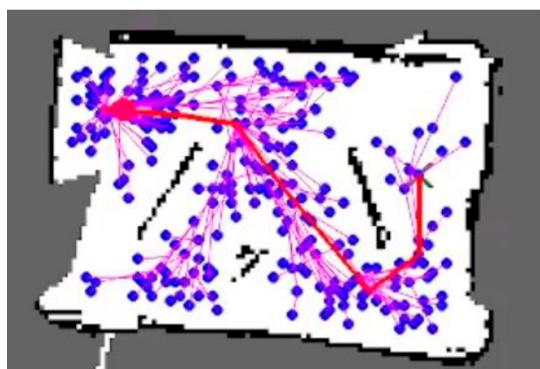
Наряду с классической версией метода поисковых случайных деревьев RRT широкое распространение получила его модификация RRT-Connect, связанная с кардинальной трансформацией порядка формирования маршрутной сети для отыскания траектории целенаправленного движения робота в пространстве возможных конфигураций. По новой схеме своей пошаговой реконструкции модель дискретного пространства поиска представляется совокупностью двух деревьев, поочередный рост которых навстречу друг другу отражает допустимые изменения состояний робота, начиная как от исходного c_{init} , так и от целевого c_{goal} соответственно (рис. 13).



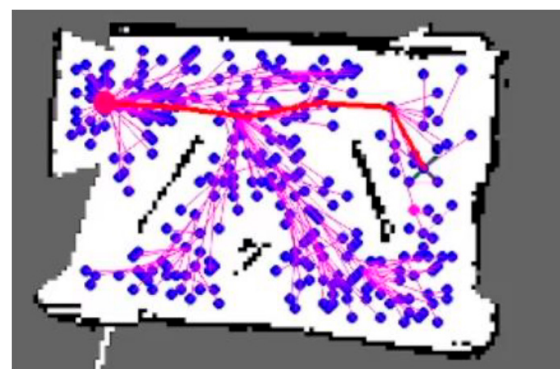
(a)



(б)



(в)



(г)

Рис. 11. Фрагменты комплексного эксперимента по планированию перемещений автономного мобильного робота с использованием метода поисковых случайных деревьев RRT*: конфигурация реальной сцены (а); построение и корректировка искомого маршрута в процессе работы алгоритма (б, в, г)

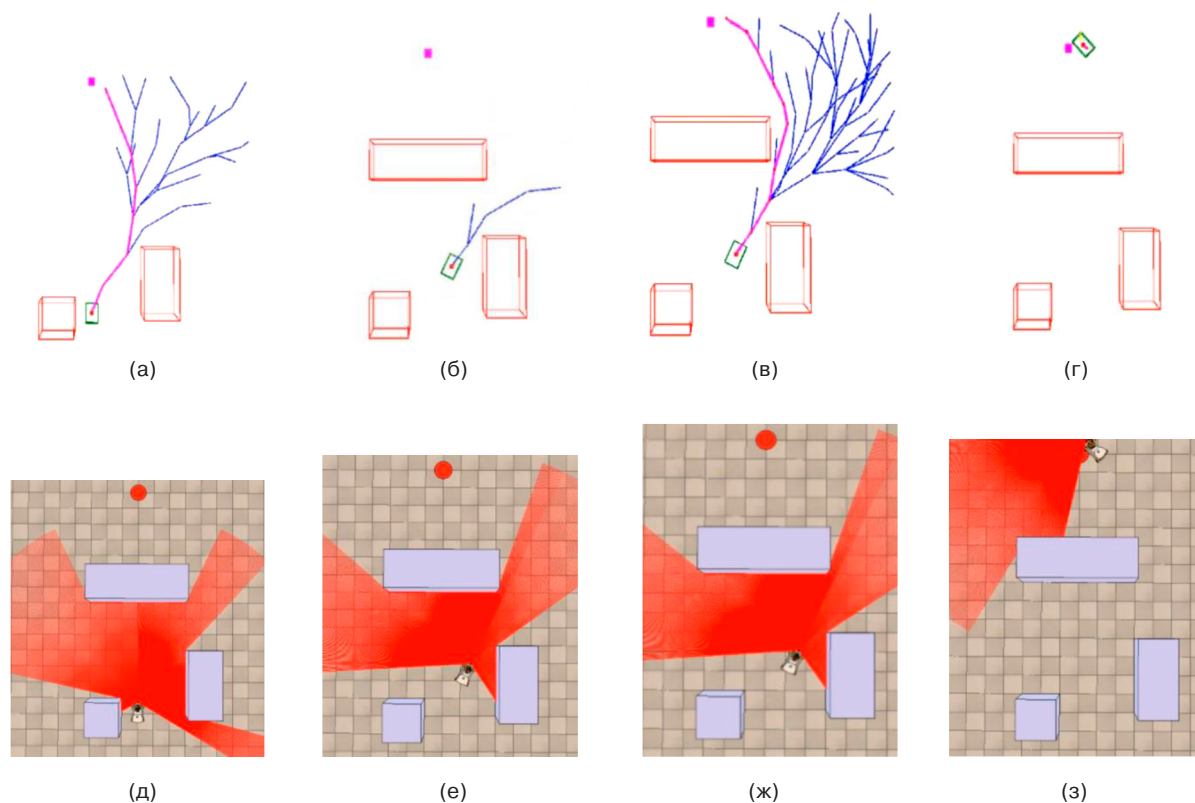


Рис. 12. Фрагменты модельных экспериментов по использованию метода поисковых случайных деревьев для планирования перемещений мобильного робота в условиях априорно неизвестной сцены: перестроение дерева поиска (а, в, д, ж) по мере обнаружения препятствий в процессе движения робота (б, г, е, з)

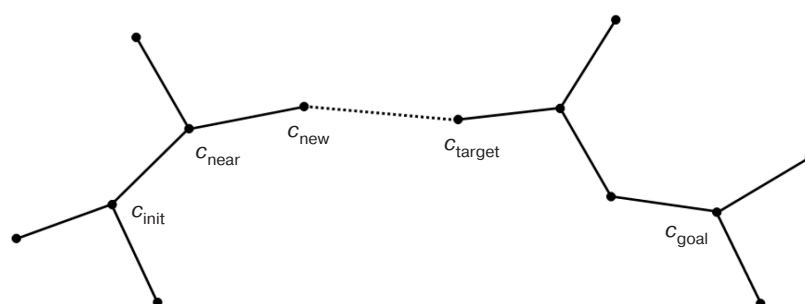


Рис. 13. Двухнаправленное исследование конфигурационного пространства в соответствии с методом поисковых случайных деревьев со встречным ростом (RRT-Connect). c_{target} – это ближайшая вершина для c_{new} , для которых происходит проверка на возможность объединения двух деревьев

Взаимное объединение синтезируемых структур обеспечивается периодическими попытками включения каждой появляющейся вершины одного дерева в состав другого. Как принято считать, метод поисковых случайных деревьев со встречным ростом и его модификации [13] обладают повышенной эффективностью по сравнению с оригинальным прототипом, что полностью подтверждается данными экспериментальных исследований, приведенных

на рис. 14, 15. Возможности, достоинства и отличительные особенности метода RRT-Connect обуславливают перспективность его использования не только для задач планирования целенаправленных перемещений подвижными объектами различных типов в условиях сложных сред, но и для задач группового управления автономными роботами при выполнении операций взаимного сближения и автоматической стыковки.

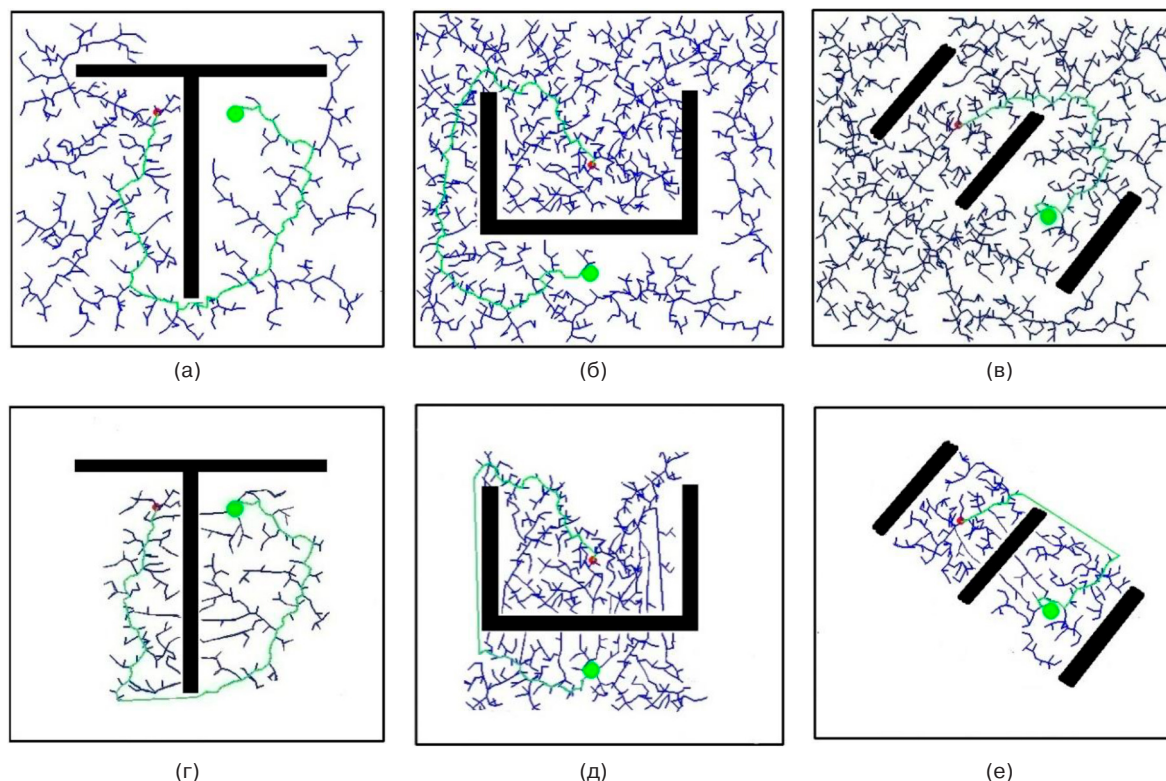


Рис. 14. Результаты экспериментальных исследований по планированию перемещений автономного мобильного робота в среде с препятствиями на основе методов RRT (а–в) и RRT-Connect (г–е)

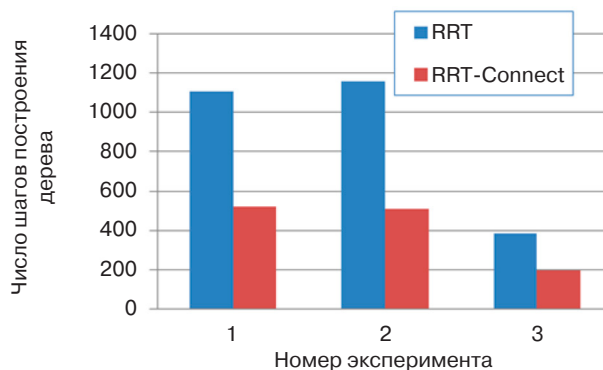


Рис. 15. Результаты экспериментальных исследований по оценке эффективности методов RRT и RRT-Connect для планирования перемещений автономного мобильного робота в среде с препятствиями

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обзор специальной литературы и проведенные экспериментальные исследования убедительно показали, что широкие возможности метода поисковых случайных деревьев позволяют обеспечить решение задач планирования перемещений для мобильных и манипуляционных роботов различных типов и компоновок, включая манипуляторы с избыточной или реконфигурируемой структурой, размещаемые на стационарном или подвижном основании. Обобщение полученных результатов открывает

реальные перспективы использования метода поисковых случайных деревьев в качестве конструктивной основы не только для создания универсальных средств планирования перемещений мобильных робототехнических систем с бортовым манипулятором, но и для решения задач автоматизации стыковки автономных подвижных платформ.

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

1. Wang X., Luo X., Han B., Chen Y., Liang G., Zheng K. Collision-free path planning method for robots based on an improved rapidly-exploring random tree algorithm. *Appl. Sci.* 2020;10(4):1381. <http://doi.org/10.3390/app10041381>
2. Noreen I., Khan A., Habib Z. Optimal path planning using RRT* based approaches: a survey and future directions. *Int. J. Adv. Computer Sci. Appl.* 2016;7(11). <https://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2016.071114>
3. LaValle S.M., Kuffner J.J. Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects. *Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*. 2000;293–308. URL: <http://lavalle.pl/papers/LavKuf01.pdf>
4. LaValle S.M., Kuffner J.J. Randomized Kinodynamic Planning. *Int. J. Rob. Res.* 2001;20(5):378–400. <https://doi.org/10.1177/02783640122067453>
5. Cao X., Zou X., Jia Ch., Chen M., Zeng Z. RRT-based path planning for an intelligent litchi-picking manipulator. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019;156:105–118. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.031>
6. Rybus T. Point-to-Point Motion Planning of a Free-Floating Space Manipulator Using the Rapidly-Exploring Random Trees (RRT) Method. *Robotica*. 2020;38(6):957–982. <https://doi.org/10.1017/S0263574719001176>
7. Karaman S., Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning. *Int. J. Robotics Res.* 2011;30(7): 846–894. <https://doi.org/10.1177/0278364911406761>
8. Solovey K., Janson L., Schmerling E., Frazzoli E., Pavone M. *Revisiting the Asymptotic Optimality of RRT**. 2020. *arXiv*: 1909.09688v2. 13 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.09688>
9. Noreen I., Khan A., Habib Z. Optimal path planning using RRT* based approaches: a survey and future directions. *Int. J. Adv. Computer Sci. Appl.* 2016;7(11):97–107. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2016.071114>
10. Adiyatov O., Varol H.A. A novel RRT*-based algorithm for motion planning in Dynamic environments. In: *2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. 2017. P. 1416–1421. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2017.8016024>
11. Yuan Ch., Liu G., Zhang W., Pan X. An efficient RRT cache method in dynamic environments for path planning. *Rob. Auton. Syst.* 2020;131(9):103595. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103595>
12. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *The Int. J. Rob. Res.* 1986;5(1): 90–98.
13. Mashayekhi R., Idris M.Y.I., Anisi M.H., Ahmedy I., Ali I. Informed RRT*-Connect: An Asymptotically Optimal Single-Query Path Planning Method. *IEEE Access*. 2020;8:19842–19852. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2969316>

Об авторах

Голубов Владимир Васильевич, аспирант, кафедра проблем управления Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: golubov@mirea.ru. <https://orcid.org/0009-0007-9227-6184>

Манько Сергей Викторович, д.т.н., профессор, кафедра проблем управления Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области образования, Член научного Совета по робототехнике и мехатронике Российской академии наук. E-mail: manko@mirea.ru. Scopus Author ID 55761014700, SPIN-код РИНЦ 2070-1592, <https://orcid.org/0000-0002-6297-8894>

About the authors

Vladimir V. Golubov, Postgraduate Student, Department of Problems Control, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: golubov@mirea.ru. <https://orcid.org/0009-0007-9227-6184>

Sergey V. Manko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Problems Control, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). Laureate of the Government Prize of the Russian Federation in the field of education, Member of the Scientific Council on Robotics and Mechatronics of the Russian Academy of Sciences. E-mail: manko@mirea.ru. Scopus Author ID 55761014700, RSCI SPIN-code 2070-1592, <https://orcid.org/0000-0002-6297-8894>

УДК 621.396.69
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-28-38>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Расчет допустимых отклонений виброускорений печатных узлов методом имитационного моделирования

**В.К. Битюков,
А.В. Долматов[@],
А.А. Задерновский,
А.И. Стариковский,
Р.М. Увайсов**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. При производстве и эксплуатации печатных узлов (ПУ) радиоэлектронных средств (РЭС) используются различные методы контроля технического состояния. Основные из них – это оптический, электрический и тепловой. Но не все возможные дефекты выявляются с использованием указанных методов. Например, ослабленное крепление ПУ в блоке или некорректная установка электрорадиоэлемента (ЭРЭ) на печатной плате выявляются только путем анализа механических характеристик РЭС, в частности значений амплитуд виброускорений на ЭРЭ или в выбранных контрольных точках печатной платы (далее – амплитуда виброускорения ПУ). Чтобы сделать вывод о наличии дефекта, измеренные значения амплитуд виброускорений, полученные в результате испытаний ПУ на воздействие гармонической вибрации, сравниваются с допустимыми значениями, рассчитанными при имитационном моделировании механических процессов в ПУ с учетом разбросов физико-механических параметров материалов и геометрических параметров конструкции ПУ. Цель работы состоит в определении допустимых значений амплитуд виброускорений ПУ, с которыми будут сравниваться измеренные значения.

Методы. Для расчета допустимых отклонений виброускорений предлагается использование метода имитационного моделирования Монте-Карло, заключающегося в многократном расчете значений амплитуд виброускорений при случайных значениях физико-механических параметров материалов и геометрических параметров конструкции ПУ в пределах своих допусков.

Результаты. В результате экспериментальной проверки описанного метода с помощью программы моделирования механических процессов *SolidWorks* определены значения допуска на виброускорения ПУ в контрольной точке на первой резонансной частоте и получены экспериментальные данные при внесении различных дефектов. Результаты сравнения измеренных значений с рассчитанным допуском позволяют сделать вывод о возможности обнаружения дефектов ПУ.

Выводы. Использование данного метода расчета допусков на амплитуду виброускорения ПУ позволяет определять наличие дефектов в РЭС, которые не влияют на электрические или тепловые характеристики РЭС, и таким образом повысить эффективность контроля технического состояния.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, имитационное моделирование, метод Монте-Карло, печатный узел, радиоэлектронное средство, механические процессы

• Поступила: 05.05.2023 • Доработана: 26.06.2023 • Принята к опубликованию: 04.09.2023

Для цитирования: Битюков В.К., Долматов А.В., Заdernовский А.А., Стариковский А.И., Увайсов Р.М. Расчет допустимых отклонений виброускорений печатных узлов методом имитационного моделирования. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):28–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-28-38>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Calculating permissible deviations of vibration accelerations of printed circuit assemblies by simulation modeling

Vladimir K. Bityukov,
Aleksey V. Dolmatov[@],
Anatoly A. Zadernovsky,
Anatoly I. Starikovsky,
Ruslan M. Uvaysov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: dolmatov@mirea.ru

Abstract

Objectives. A variety of technical condition control methods are used in the production and operation of printed circuit assemblies (PCA) for radio-electronic means (REM). The main methods are optical, electrical, and thermal. However, not all possible defects can be detected using these methods. For example, a weakened PCA fastener in a block or the incorrect installation of an electric radioelement (ERE) on a printed circuit board (PCB) can be detected only by analyzing the mechanical characteristics of the REM. These factors, in particular, are the values of the vibration acceleration amplitudes on ERE or at selected PCB control points (hereinafter referred to as the PCA vibration acceleration amplitude). In order to draw a conclusion about the presence of a defect, the measured values of the vibration acceleration amplitudes obtained as a result of testing PCA for the effects of harmonic vibration are compared with the permissible values calculated during the simulation of mechanical processes in PCA. This takes into account the variations in the physical and mechanical parameters of materials and geometric parameters of the PCA design. The aim of this paper is to determine the permissible values of PCA vibration acceleration amplitudes to be compared with the measured values.

Methods. The Monte Carlo simulation method is used to calculate the permissible deviations of vibration accelerations. This consists in repeatedly calculating the values of the vibration acceleration amplitudes at random values of the physical and mechanical parameters of materials and geometric parameters of the PCA design within their tolerances.

Results. Experimental verification of this method was carried out using the *SolidWorks* software for modeling mechanical processes. This enabled the tolerance values for PCA vibration acceleration at the control point at the first resonant frequency to be established and experimental data to be obtained when introducing various defects. The results of comparing the measured values with the calculated tolerance enabled conclusions to be made with regard to the possibility of detecting PCA defects.

Conclusions. Using this method of calculating tolerances for the PCA vibration acceleration amplitude allows the presence of defects in REM that do not affect the electrical or thermal characteristics of REM to be determined, thus increasing the efficiency of technical condition control.

Keywords: non-destructive testing, simulation modeling, Monte Carlo method, printing circuit boards, electronic means, mechanical processes

• Submitted: 05.05.2023 • Revised: 26.06.2023 • Accepted: 04.09.2023

For citation: Bityukov V.K., Dolmatov A.V., Zadernovsky A.A., Starikovskiy A.I., Uvaysov R.M. Calculating permissible deviations of vibration accelerations of printed circuit assemblies by simulation modeling. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):28–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-28-38>

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

Современные радиоэлектронные средства (РЭС) являются сложными устройствами, как с точки зрения электрических схем, так и с точки зрения конструктивного исполнения. Широкое разнообразие схемных и конструктивных решений¹, а также материалов, используемых в производстве РЭС², обуславливает наличие отклонений их характеристик от своих номинальных значений. Как правило, для определения технического состояния РЭС проводят его диагностирование [1, 2] по электрическим, тепловым и механическим характеристикам³. Методы диагностирования по электрическим и тепловым характеристикам достаточно хорошо развиты и проработаны [3–6], в то время как диагностирование по механическим характеристикам продолжает оставаться актуальной задачей в связи со сложностями контроля механических характеристик и многообразием механических связей, имеющихся в современных конструкциях РЭС [7–9].

Несмотря на высокие требования к качеству и надежности выпускаемой продукции на этапе производства, существует вероятность возникновения различных дефектов, таких как деформация

электрорадиоэлементов (ЭРЭ), ослабление их крепежа или печатной платы, образование трещины в печатной плате, которые в определенной степени будут влиять на механический режим работы и могут привести к нарушению работоспособности РЭС.

Стадия производства печатных узлов (ПУ) завершается испытаниями для подтверждения их надежности в течение всего жизненного цикла. В зависимости от специфики РЭС они подвергаются большому числу различных натурных испытаний⁴ [10]. Подавляющее большинство РЭС испытывают на механические воздействия, прежде всего вибрационные [11–13]. При этом измеренные характеристики сравнивают с предельно допустимыми для оценки виброустойчивости РЭС [14]. Но ряд дефектов (например, ослабленное крепление ПУ, неправильная установка ЭРЭ и др.) могут и не вызывать превышения измеренного значения механической характеристики над предельно допустимым значением, но могут привести к отказам РЭС в процессе эксплуатации. Поэтому в данной работе предлагается сравнивать измеренные значения механических характеристик со значениями их допусков, обусловленными разбросом физико-механических и геометрических параметров материалов РЭС, и по результатам сравнения делать вывод о техническом состоянии РЭС.

МЕТОД РАСЧЕТА ДОПУСТИМЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ВИБРОУСКОРЕНИЙ ПУ

Одним из методов контроля технического состояния, реализация которого необходима для обеспечения высокой надежности РЭС, является метод неразрушающего контроля по механическим

¹ Муромцев Д.Ю., Тюрин И.В., Белоусов О.А., Курносов Р.Ю. *Проектирование функциональных узлов и модулей радиоэлектронных средств*: учебное пособие для вузов. 2-е изд., стер. СПб.: Лань; 2021. 252 с. [Muromtsev D.Yu., Tyurin I.V., Belousov O.A., Kurnosov R.Yu. *Design of functional units and modules of radioelectronic devices*: A textbook for universities. 2nd ed. St. Petersburg: Lan; 2021. 252 p. (in Russ.).]

² Покровская М.В., Попова Т.А. *Материалы и элементы конструкций РЭС*: учебное пособие. М.: РТУ МИРЭА; 2021. Часть 1: Материаловедение и конструкционные материалы. 200 с. [Pokrovskaya M.V., Popova T.A. *Materials and structural elements of REM*: A textbook. Moscow: RTU MIREA; 2021. Part 1: Material science and structural materials. 200 p. (in Russ.).]

³ Давыдов П.С. *Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем*. М.: Радио и связь; 1988. 256 с. [Davydov P.S. *Technical diagnostics of radioelectronic devices and systems*. Moscow: Radio and Communications; 1988. 256 p. (in Russ.).]

⁴ Баранов В.М., Карасевич А.М., Сарычев Г.А. *Испытания и контроль качества материалов и конструкций*: учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа; 2004. 359 с. [Baranov V.M., Karasevich A.M., Sarychev G.A. *Testing and quality control of materials and structures*: A textbook for universities. Moscow: Higher School; 2004. 359 p. (in Russ.).]

характеристикам, основанный на сравнении значений амплитуд виброускорений ЭРЭ и в контрольных точках на печатной плате проверяемого ПУ и эталонного образца ПУ. Наличие дефектов в ПУ приводит к отклонению амплитуд виброускорений ЭРЭ от своих номинальных значений, причем, как в большую, так и в меньшую сторону.

Амплитуда виброускорений ПУ зависит от физико-механических параметров материалов ПУ, геометрических параметров конструктивных элементов ПУ, мест крепления ПУ.

Для того чтобы проводить контроль ПУ по механическим характеристикам, необходимо создать его эталонную механическую модель, результаты расчета которой будут использоваться для сравнения с измеренными значениями амплитуд виброускорений исследуемых образцов ПУ. Для создания механической модели можно использовать различные программы моделирования механических процессов в РЭС. Точность моделирования механических характеристик ПУ определяется многими факторами. Среди них можно выделить корректность и полноту описания топологической модели механических процессов, а именно: описание условий крепления, задание таких значений физико-механических параметров материалов и геометрических размеров элементов конструкции, которые бы максимально соответствовали реальным значениям. Для большинства инженерных расчетов, как показывает практика, погрешность моделирования механических характеристик составляет не более 30% при предварительных расчетах и порядка 5–10% для расчетов с уточненными данными.

Стоит отметить, что исходные данные о значениях физико-механических параметров материалов РЭС, необходимые для моделирования механических процессов и приведенные в различных справочниках, как правило, получены в результате экспериментальных исследований и заданы в определенном диапазоне значений. Модель механических процессов в ПУ, анализ которой выполнен с уточненными физико-механическими параметрами материалов и с экспериментально исследованным распределением амплитуд виброускорений ЭРЭ ПУ, можно принять за эталонную модель и использовать ее для контроля технического состояния при экспериментальных испытаниях образцов ПУ.

При использовании эталонной механической модели исследуемого ПУ в программе моделирования механических процессов вычисляются допуски на значения амплитуд виброускорений ЭРЭ, по результатам чего определяются максимально допустимое ($a^{\max}$) и минимально допустимое ($a^{\min}$) значения амплитуд виброускорений для каждого ЭРЭ. Эти результаты моделирования являются основой для

сравнения с экспериментально полученными значениями, отклонения которых за пределы допуска рассматриваются как различного вида дефекты [2].

Для определения пригодности ПУ к эксплуатации необходимо рассчитать допусковый интервал $[a_{\text{ПУ}m}^{\min}, a_{\text{ПУ}m}^{\max}]$ для каждой m -й контрольной точки вектора измеренных значений виброускорений $\overline{a_{\text{ПУ}m}}$. ПУ будет считаться исправным, если выполняется условие:

$$\overline{a_{\text{ПУ}m}} \in [a_{\text{ПУ}m}^{\min}, a_{\text{ПУ}m}^{\max}].$$

При контроле технического состояния ПУ используются минимально ($a_{\text{ПУ}m}^{\min}$) и максимально ($a_{\text{ПУ}m}^{\max}$) допустимые значения амплитуд виброускорений ПУ, а для расчета показателей безотказности можно использовать максимальное значение $a_{\text{ПУ}m}^{\max}$.

После расчета эталонной механической модели ПУ проводится измерение виброускорений в контрольных точках исследуемой группы ПУ с помощью вибродатчиков. Полученные в результате измерений значения амплитуд виброускорений ПУ сопоставляются со своими предельно допустимыми значениями, и по результатам сравнения делается вывод о техническом состоянии ПУ. Значения амплитуды виброускорения элементов для исправных образцов ПУ должны лежать в диапазоне значений, полученном в результате расчета эталонной механической модели. Образец ПУ, в котором обнаружилось отклонение амплитуды виброускорения ПУ за рассчитанные пределы, рассматривается как дефектный.

Рассмотренная эталонная механическая модель ПУ получена при значениях параметров конструкций РЭС, лежащих в пределах своих допусков. Но механическую модель можно использовать и для формирования базы неисправностей – справочника распределения амплитуд виброускорений по поверхности ПУ при наличии какого-либо дефекта. Такой справочник формируется заранее перед проведением диагностирования ПУ. С помощью данного метода можно выявлять как дефекты, связанные с установкой ЭРЭ, так и дефекты, связанные с производством печатной платы.

Таким образом, эталонная механическая модель ПУ учитывает как разброс различных параметров (физико-механических параметров материалов, геометрических параметров конструкций) в пределах своих допусков при использовании модели для поиска дефектных изделий, так и возможное наличие типовых дефектов в ПУ при использовании модели для идентификации дефектов в исследуемых ПУ.

Существующие модели и методы расчета механических режимов конструкций РЭС в некоторых

случаях не позволяют детально проанализировать влияние физико-механических параметров материалов конструкции РЭС и геометрических параметров конструкций РЭС на механический режим изделия. Большими возможностями при решении данной проблемы обладает метод статистических испытаний Монте-Карло, который можно использовать применительно к моделированию различных физических процессов в РЭС, в частности, механических процессов в конструкции ПУ и РЭС в целом [15, 16]. Преимущества метода Монте-Карло перед другими методами при исследовании физических процессов состоят в следующем: достаточно простой математический аппарат вычислений, наглядная физическая интерпретация рассматриваемой задачи упрощают процесс программирования и делают его легко контролируемым на стадии отладки программы.

При применении метода Монте-Карло используется специальная программа – генератор случайных чисел. Данная программа многократно выдает случайные значения некоторой величины, которые распределены в соответствии с заданным законом распределения. Для каждого значения случайной величины определяются значения механических характеристик РЭС. Данный расчет повторяется заданное пользователем количество раз, при этом для каждого расчета значения параметров модели принимают случайные значения, которые лежат в границах своих допусков. По итогам моделирования строятся гистограммы, демонстрирующие законы распределения механических характеристик,

по которым рассчитываются математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение амплитуд виброускорения ПУ.

Используемый метод не требует вычисления функций параметрической чувствительности. Однако требуются большие затраты машинного времени, которые зависят от сложности механической модели и количества итераций. При этом погрешность метода, как правило, составляет порядка 10%.

Структурная схема метода расчета предельно допустимых значений амплитуды виброускорения ЭРЭ с помощью имитационного моделирования механических процессов приведена на рис. 1.

При моделировании с использованием данного метода учитываются такие факторы, как отклонения значений физико-механических параметров материалов и геометрических параметров конструкции РЭС в пределах своих допусков. Использование имитационного моделирования позволяет набрать достаточно много статистической информации, на основании которой определяется допустимый разброс значений виброускорений ЭРЭ.

Исходными данными для проведения моделирования являются:

- описание конструкции РЭС;
- $q_{Mi}^{\min}, q_{Mi}^{\max}$ – минимальное и максимальное значения i -го физико-механического параметра конструкции РЭС соответственно;
- $q_{Tj}^{\min}, q_{Tj}^{\max}$ – минимальное и максимальное значения j -го геометрического параметра конструкции РЭС соответственно.

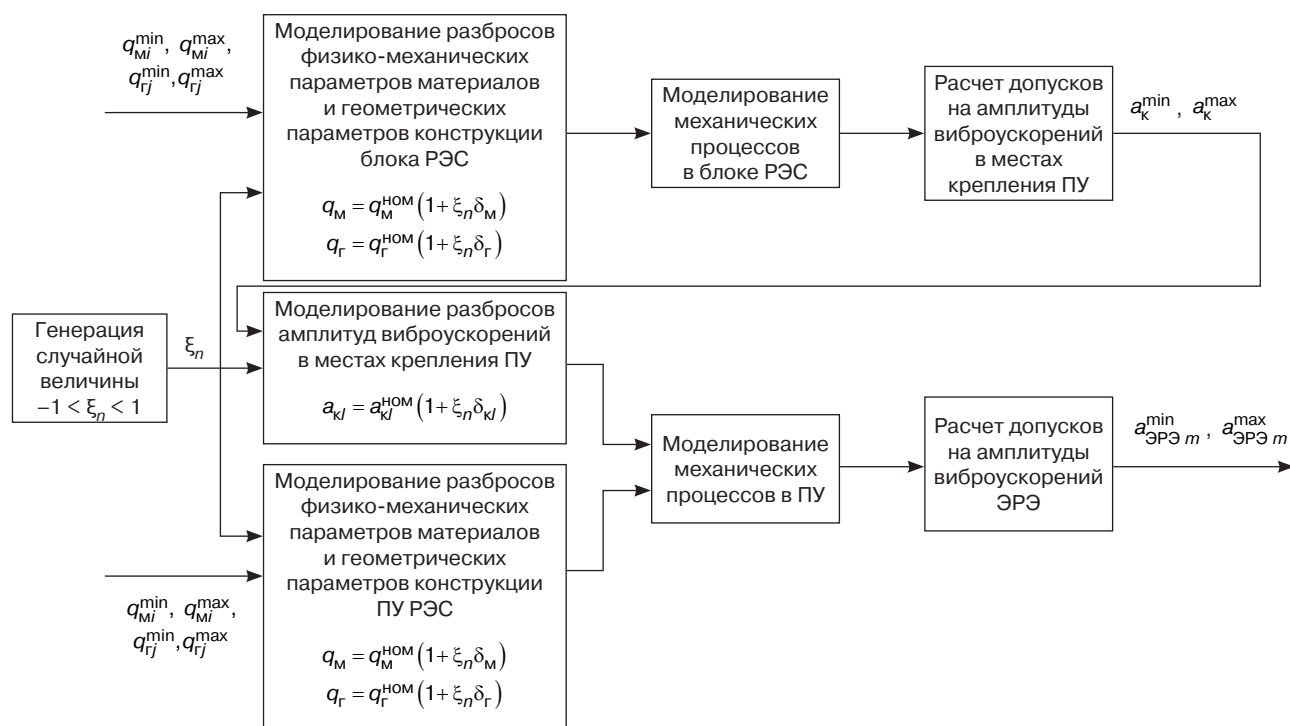


Рис. 1. Структурная схема метода расчета допустимых отклонений виброускорений ПУ.

$a_{kl}^{\text{НОМ}} = (a_{kl}^{\min} + a_{kl}^{\max})/2$. $a_{\text{ЭРЭ } m}^{\min}, a_{\text{ЭРЭ } m}^{\max}$ – допуски на амплитуды виброускорений ЭРЭ

С использованием программы моделирования механических режимов работы РЭС на первом этапе проводится многократный (N раз) механический расчет конструкции РЭС, в которой установлен ПУ (как правило, это блок). Данный расчет проводится с целью определения разброса значений амплитуд виброускорений в местах крепления ПУ.

Номинальное значение параметра можно определить исходя из минимальной и максимальной границ диапазона разброса его фактического значения с учетом нормального закона распределения параметра по формуле:

$$q^{\text{ном}} = (q^{\text{max}} + q^{\text{min}})/2.$$

Значение относительного допуска на значение параметра определяется по формуле:

$$\delta = (q^{\text{max}} - q^{\text{min}})/q^{\text{ном}}.$$

Значения физико-механических параметров материалов (q_m) и геометрических параметров конструкций (q_r) для каждой реализации метода Монте-Карло принимают случайные значения в пределах своих допусков с учетом значения случайной величины ξ_n в соответствии с формулами:

$$q_m = q_m^{\text{ном}}(1 + \xi_n \delta_m), \quad q_r = q_r^{\text{ном}}(1 + \xi_n \delta_r).$$

Значения случайной величины ξ_n генерируются в соответствии с нормальным законом распределения случайной величины с нулевым математическим ожиданием и значением среднеквадратического отклонения $\sigma = 0.33$. Создается усеченное нормальное распределение величины ξ_n на интервале $\pm 3\sigma$.

Проведя N расчетов механического режима конструкции ПУ, получают N значений амплитуд виброускорений (a_k) в местах крепления ПУ. По этим значениям определяется математическое ожидание амплитуды виброускорений в каждой точке крепления ПУ $m(a_k)$:

$$m(a_k) = \frac{\sum_{n=1}^N a_k^n}{N},$$

где a_k^n – значение амплитуды виброускорения в месте крепления ПУ на n -й реализации.

Дисперсия виброускорения $D(a_k)$ определяется по формулам:

$$D(a_k) = \frac{\sum_{n=1}^N (a_k^n - m(a_k))^2}{N - 1}$$

или

$$D(a_k) = \left(\frac{\sum_{n=1}^N (a_k^n)^2}{N} - (m(a_k))^2 \right) \frac{N}{N - 1}.$$

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(a_k)$ амплитуды виброускорения в месте крепления ПУ рассчитывается по формуле:

$$\sigma(a_k) = \sqrt{D(a_k)}.$$

Для определения диапазона допустимых значений амплитуды виброускорения $[a_k^{\text{min}}, a_k^{\text{max}}]$ необходимо задать доверительную вероятность β

$$\beta = P(a_k^{\text{min}} \leq a_k \leq a_k^{\text{max}}),$$

с которой фактическое значение амплитуды виброускорения может лежать в этом диапазоне. С учетом значения вероятности β по справочным данным определяется значение коэффициента χ . Например, для значения доверительной вероятности $\beta = 0.9973$ величина коэффициента χ равна 3.

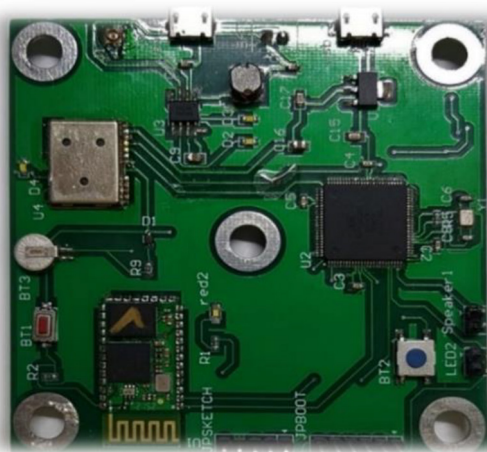
Минимальное (a_k^{min}) и максимальное (a_k^{max}) значения амплитуды виброускорения с учетом значения коэффициента χ для заданной вероятности β рассчитываются по формулам:

$$a_k^{\text{min}} = m(a_k) - \chi \sigma(a_k), \quad a_k^{\text{max}} = m(a_k) + \chi \sigma(a_k).$$

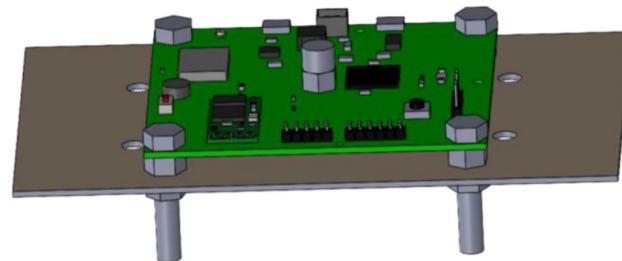
В результате расчета механического режима блока определяется диапазон $[a_k^{\text{min}}, a_k^{\text{max}}]$, в котором могут находиться значения амплитуд виброускорений в местах крепления ПУ.

Затем аналогичным образом проводится статистическое моделирование механических процессов в ПУ, задавая случайным образом значения амплитуды виброускорения в местах крепления ПУ из диапазона $[a_k^{\text{min}}, a_k^{\text{max}}]$ и значения физико-механических параметров материала печатной платы и геометрических параметров конструкции ПУ из диапазона возможных значений. В результате моделирования определяется диапазон $[a_{\text{ПУ}m}^{\text{min}}, a_{\text{ПУ}m}^{\text{max}}]$, в пределах которого должны лежать значения амплитуд виброускорения ЭРЭ для исправных ПУ.

Процесс контроля ПУ по механическим характеристикам предъявляет повышенные требования к достоверности моделирования механических режимов в ПУ. При построении модели механических процессов принимаются некоторые допущения, которые также надо учитывать при анализе результатов моделирования.



(a)



(б)

Рис. 2. Вид исследуемого ПУ (а) и его модель в программе *SolidWorks* (б)

Погрешность $\Delta_a^{\text{расч}}$ расчета амплитуд виброускорений ЭРЭ определяется по следующей формуле:

$$\Delta_a^{\text{расч}} = \sqrt{\Delta_M^2 + \Delta_r^2 + \Delta_c^2 + \Delta_\xi^2},$$

где Δ_M – погрешность, с которой заданы значения физико-механических параметров материалов конструкции РЭС; Δ_r – погрешность, с которой заданы значения геометрических параметров конструкции РЭС; Δ_c – погрешность, зависящая от шага расчетной сетки; Δ_ξ – погрешность, определяемая количеством реализаций метода Монте-Карло.

Погрешность определения предельно допустимых отклонений амплитуд виброускорений ЭРЭ определяется, помимо погрешности $\Delta_a^{\text{расч}}$, вносимой различными допущениями при создании механической модели, еще и количеством реализаций N в методе Монте-Карло. Относительную погрешность, связанную с количеством реализаций, можно определить по формуле:

$$\Delta_\xi = 3\sqrt{\frac{D(\xi)}{N}}.$$

Задача обеспечения точности моделирования механических процессов является очень важной, т.к. от этого зависит результат контроля ПУ по механическим характеристикам. Некорректный результат может привести к «забраковке» исправного изделия, либо к пропуску изделия с дефектом, что грозит серьезными последствиями при его эксплуатации.

Для реализации данного метода можно использовать различные программы моделирования механических процессов в конструкциях РЭС разного уровня

иерархии, такие как *АСОНИКА-ТМ*⁵, *SolidWorks*⁶ и др. [17, 18].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДА РАСЧЕТА ДОПУСКОВ ВИБРОУСКОРЕНИЙ ПУ

Для экспериментальной проверки описанного метода использовалось бортовое радиоэлектронное устройство контроля параметров разбега, представляющее собой печатную плату с установленными на ней ЭРЭ: микроконтроллером Atmel ATmega 2560 (Atmel Corporation, США), акселерометром InvenSense MPU-6050 (InvenSense Inc., США), Global Navigation Satellite System приемником U-blox Neo 7M (U-blox, Швейцария), чипом Bluetooth HC-05 (Core Electronics, Китай) и источником питания AMS1117-3.3 (UMW, Китай).

Для расчета допусков на значение амплитуды виброускорения было проведено моделирование механических процессов ПУ с использованием программы *SolidWorks*. Внешний вид исследуемого ПУ и его модель представлены на рис. 2.

При моделировании был задан разброс плотности материала печатной платы 1500–1800 кг/м³ и модуля упругости 22–26 ГПа. Количество реализаций метода Монте-Карло – 500. В результате моделирования был получен разброс амплитуды виброускорения ПУ в контрольной точке ПУ (контрольная точка находится в центре печатной платы и была выбрана по результатам анализа распределения значений виброускорений по печатной плате, исходя из максимального значения) в исправном состоянии на первой резонансной частоте, значение которой составило 170 Гц. Разброс значений амплитуды виброускорения

⁵ <https://asonika-online.ru/products/asonika-tm/> (in Russ.). Дата обращения 15.06.2023. / Accessed June 15, 2023.

⁶ <https://www.solidworks.com/>. Дата обращения 15.06.2023. / Accessed June 15, 2023.

составил от 4.8 м/с^2 до 5.2 м/с^2 , соответственно величина допуска была равна $\pm 0.2 \text{ м/с}^2$. Затем было проведено моделирование механических процессов в ПУ с имитацией различных дефектов: ослабленное крепление ПУ (дефект № 1), отсутствие ЭРЭ (дефект № 2), трещина в печатной плате (дефект № 3), другая толщина печатной платы (дефект № 4). В результате моделирования были получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) виброускорения в контрольной точке ПУ, приведенные на рис. 3.

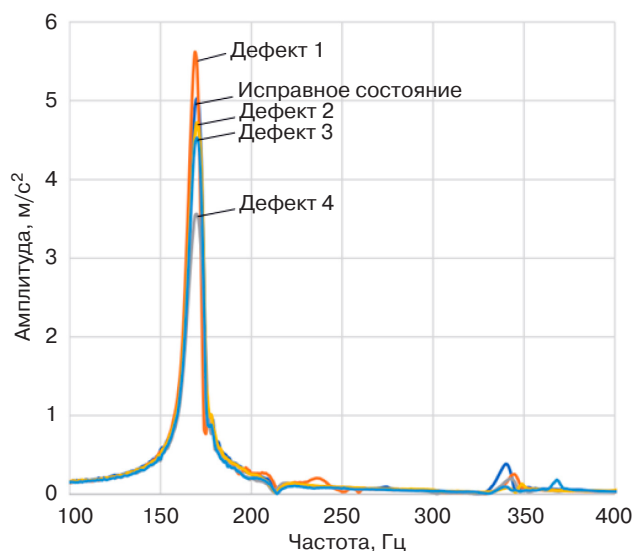


Рис. 3. Расчетные значения АЧХ в контрольной точке ПУ в исправном состоянии и при различных дефектах

Как видно из графиков, каждый из дефектов вызвал отклонение значений АЧХ виброускорений в контрольной точке ПУ от АЧХ для исправного состояния. Причем наиболее эффективно проводить сравнение АЧХ на первой резонансной частоте, т.к. при других частотах результат сравнения может быть некорректен за счет малого отличия значений амплитуд виброускорений, сравнимых с погрешностями расчета.

Далее были проведены экспериментальные исследования механических характеристик исправного ПУ и ПУ с одиночными дефектами, которые имитировались при моделировании. Эксперимент проводился с помощью вибростенда (рис. 4) на частоте гармонической вибрации, равной первой резонансной частоте (170 Гц), полученной в результате моделирования. В результате были получены экспериментальные значения амплитуд виброускорений в контрольной точке ПУ на резонансной частоте при различных дефектах: ослабленное крепление ПУ (дефект № 1) — 5.6 м/с^2 , отсутствие ЭРЭ (дефект № 2) — 4.7 м/с^2 , трещина в печатной плате (дефект № 3) — 4.5 м/с^2 , другая толщина печатной платы (дефект № 4) — 3.5 м/с^2 .

Как видно из результатов эксперимента, каждый из дефектов вызвал отклонение значений



Рис. 4. Установка для проведения экспериментального исследования ПУ при воздействии гармонической вибрации

виброускорений в контрольной точке ПУ от значения для исправного состояния за пределы рассчитанного допуска, полученного в результате моделирования. Причем некоторые дефекты могут вызывать примерно одинаковое изменение виброускорения в контрольной точке ПУ (например, дефекты № 2 и № 3 в эксперименте), сравнимое с погрешностью измерений, что говорит о невозможности однозначного определения вида дефекта (о наличии конкретного вида дефекта можно говорить только с определенной долей вероятности, определяемой на основании анализа возможных видов дефектов в исследуемом образце РЭС). Следовательно, проводя сравнение измеренных значений виброускорений с пределами допуска, полученными в результате имитационного моделирования, можно сделать вывод о наличии или отсутствии дефектов в ПУ и с определенной вероятностью определить вид возможных дефектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод расчета допусков на амплитуду виброускорения ПУ, основанный на имитационном моделировании с использованием метода Монте-Карло механических процессов в ПУ РЭС. При этом учитывается разброс физико-механических и геометрических параметров конструкции РЭС. По результатам проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод о правомерности применения описанного метода расчета допустимых значений виброускорений ПУ в практике производства для контроля технического состояния ПУ РЭС и поиска дефектов. Данный метод позволяет эффективно распознавать наличие одиночных дефектов в ПУ. Исследования в направлении возможного определения кратных дефектов (одновременное наличие двух и более дефектов в ПУ) ведутся авторами представленной работы в настоящее время.

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

1. Алкадарский А.Э.М., Долматов А.В., Увайсов Р.И. Задачи диагностики на протяжении жизненного цикла изделия. *Проблемы качества, безопасности и диагностики в условиях информационного общества*. 2004;1:103–104.
2. Долматов А.В., Сулейманов С.П., Увайсов Р.И. Диагностирование целостности конструкции электронной аппаратуры. *Проблемы качества, безопасности и диагностики в условиях информационного общества*. 2004;1:99–100.
3. Увайсов С.У., Черноверская В.В., Туан Н.В., Данг Н.В. Применение подхода Сешу-Уоксмэна и алгоритма Кохонена в задаче электрической диагностики аналоговых цепей. *Радиотехника*. 2022;86(12):79–89. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=dtpiyj>
4. Долматов А.В., Лобурец Д.А., Увайсов С.У. Комплексное электротепловое моделирование при проектировании и диагностировании радиоэлектронных средств. *Информатика-машиностроение*. 1998;2:23–31.
5. Увайсов С.У., Черноверская В.В., Данг Н.В., Туан Н.В. Применение искусственной нейронной сети в задаче тепловой диагностики печатного узла бортового устройства контроля разбега самолета. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2022;10(3): 23–24. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.38.3.012>
6. Куан Д.А., Увайсова А.С., Демченко С.К., Хань Ф.Л.К. Алгоритм Кохонена в задачах классификации дефектов печатных узлов. *Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна». Серия: Естественные и инженерные науки*. 2020;4(49):38–45.
7. Тихонов А.Н., Увайсов С.У., Иванов И.А., Лышов С.М. Концепция и метод диагностирования печатных узлов с использованием встроенных эмуляторов вибрационных колебаний. *Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии*. 2016;4(36):144–154.
8. Лышов С.М., Увайсов С.У., Черноверская В.В., Хань Ф.Л.К. Инженерная методика вибродиагностики конструкций бортовых радиоэлектронных средств. *Наукоемкие технологии*. 2020;21(2):17–28.
9. Эдвабник В.Г., Кузнецов М.М. Повышение надежности измерения ускорений при виброиспытаниях. *Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий (Вестник СГУГиТ)*. 2023;28(1): 133–141. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50759471>
10. Ямпурин Н.П., Денисюк А.А. Тепловые испытания бортовых радиоэлектронных средств. В сб.: *World Science: Problems and Innovations: сборник статей LII Международной научно-практической конференции*. Пенза, 30 марта 2021 г. С. 64–67.
11. Иванов И.А., Увайсов С.У., Увайсов Р.И. Вибродиагностика блоков радиоэлектронных средств. *Труды международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2009. Т. 2. С. 75–77.
12. Бакулин Я.Ю., Журавлев В.Ю. Виброиспытания изделий ракетно-космической техники. В сб.: *Решетневские чтения: материалы Международной научной конференции*. 2014. Т. 1. С. 123–124.
13. Туркалов О. Основы вибрационных испытаний и анализа конструкций. *Технологии в электронной промышленности*. 2018;1(101):54–65.
1. Alkadarskii A.E.M., Dolmatov A.V., Uvaisov R.I. Diagnostic tasks throughout the product life cycle. *Problemy kachestva, bezopasnosti i diagnostiki v usloviyakh informatsionnogo obshchestva = Problems of Quality, Safety and Diagnostics in the Information Society*. 2004;1:103–104 (in Russ.).
2. Dolmatov A.V., Suleimanov S.P., Uvaisov R.I. Diagnosing the integrity of the electronic equipment design. *Problemy kachestva, bezopasnosti i diagnostiki v usloviyakh informatsionnogo obshchestva = Problems of Quality, Safety and Diagnostics in the Information Society*. 2004;1:99–100 (in Russ.).
3. Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Nguyen V.T., Nguyen V.D. Application of the Seshu-Waxman approach and the Kohonen algorithm in the problem of electrical diagnostics of analog circuits. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2022;86(12):79–89 (in Russ.). Available from URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=dtpiyj>
4. Dolmatov A.V., Loburets D.A., Uvaisov S.U. Complex electrothermal modeling in the design and diagnostics of radioelectronic devices. *Informatika-mashinostroyeniye = Computer Science-Mechanical Engineering*. 1998;2:23–31 (in Russ.).
5. Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Nguyen V.D., Nguyen V.T. The use of an artificial neural network in thermal diagnostics of the printed node of the on-board take-off control device of an aircraft. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2022;10(3): 23–24. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.38.3.012>
6. Quan D.A., Han Ph.L.Q. Uvaysova A.S., Demchenko S.K. Kohonen algorithm in problems of classification of defects of printed circuit assemblies. *Vestnik Mezhdunarodnogo universiteta prirody, obshchestva i cheloveka "Dubna". Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki = E- Journal of Dubna State University. A Series of "Science of Man and Society"*. 2020;4(49):38–45 (in Russ.).
7. Tikhonov A.N., Uvaysov S.U., Ivanov I.A., Lyshov S.M. The concept and method of diagnosis of printed board assembly with using on-board emulators of oscillation. *Prikaspiiskii zhurnal: Upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2016;4(36):144–154 (in Russ.).
8. Lyshov S.M., Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Han Ph.L.Q. Engineering technique for vibrodiagnostics of structures of on-board radio electronic means. *Naukoemkie tekhnologii = Science Intensive Technologies*. 2020;21(2):17–28 (in Russ.).
9. Edvabnik V.G., Kuznetsov M.M. Improving the reliability of measuring accelerations during vibration tests. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (Vestnik of SGUGiT)*. 2023;28(1):133–141 (in Russ.). Available from URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50759471>
10. Yampurin N.P., Denisyuk A.A. Testing on-board electronic equipment for temperature effects. In: *World Science: Problems and Innovations: Collection of articles of the LII International Scientific and Practical Conference*. Penza, March 30, 2021. P. 64–67 (in Russ.).

14. Сафронов П.В. Влияние конструкции электронного блока управления автомобиля на вибростойкость его электронных компонентов. В сб.: *Акустика среды обитания 2022: материалы VII Всероссийской конференции*. Москва, 26–27 мая 2022 г. Т. 1. С. 198–206.
15. Дехтярук Н.Т., Видалко Е.Н. Имитационное моделирование в радиотехнических системах. *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. 2006;9(9):13–22. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12773332>
16. Лышов С.М., Иванов И.А., Увайсова А.С., Увайсова С.С. Расчет разбросов резонансных частот печатных узлов электронных средств. *Вестник кибернетики*. 2018;4(32):129–135.
17. Шалумов А.С. АСОНИКА – российская САПР электроники в части виртуальных испытаний. *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2022;3:82–83. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2022.214.3.82.83>
18. Шалумов А.С., Чабриков С.В., Травкин Д.Н., Шалумов М.А. АСОНИКА-ТМ: моделирование конструкций печатных узлов на тепловые и механические воздействия. *Автоматизация. Современные технологии*. 2021;75(3):99–107. <https://doi.org/10.36652/0869-4931-2021-75-3-99-107>
11. Ivanov I.A., Uvaysov S.U., Uvaysov R.I. Vibrodiagnostics of radio-electronic devices. In: *Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*. 2009. V. 2. P. 75–77 (in Russ.).
12. Bakulin Ya.Yu., Zhuravlev V.Yu. Vibration testing of rocket and space technology products. In: *Reshetnev Readings: Materials of the International Scientific Conference*. 2014. V. 1. P. 123–124 (in Russ.).
13. Turkalov O. Fundamentals of vibration testing and structural analysis. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti = Technologies in the Electronic Industry*. 2018;1(101):54–65 (in Russ.).
14. Safronov P.V. The influence of the design of the electronic control unit of the car on the vibration resistance of its electronic components. In: *Acoustics of the Habitat 2022: Proceedings of the 7th All-Russian Conference*. Moscow, May 26–27, 2022. V. 1. P. 198–206 (in Russ.).
15. Dekhtyaruk N.T., Vidalko E.N. Imitative simulation in radio engineering systems. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2006;49(9):9–15. [Original Russian Text: Dekhtyaruk N.T., Vidalko E.N. Imitative simulation in radio engineering systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Radioelektronika*. 2006;49(9):13–22 (in Russ.). Available from URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12773332>]
16. Lyshov S.M., Ivanov I.A., Uvaisova A.S., Uvaisova S.S. Calculation of resonant frequency spreads of printed circuit assembly of electronic devices. *Vestnik kibernetiki = Proceedings in Cybernetics*. 2018;4(32):129–135 (in Russ.).
17. Shalumov A.S. ASONIKA – Russian CAD electronics in terms of virtual tests. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*. 2022;3:82–83 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2022.214.3.82.83>
18. Shalumov A.S., Chabrikov S.V., Travkin D.N., Shalumov M.A. ASONIKA-TM: modeling of printed circuit board design for thermal and mechanical effects. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii = Automation. Modern Technologies*. 2021;75(3):99–107 (in Russ.). <https://doi.org/10.36652/0869-4931-2021-75-3-99-107>

Об авторах

Битюков Владимир Ксенофонович, д.т.н., профессор, профессор кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bitukov@mirea.ru. ResearcherID Y-8325-2018, Scopus Author ID 6603797260, SPIN-код РИНЦ 3834-5360, <https://orcid.org/0000-0001-6448-8509>

Долматов Алексей Вячеславович, к.т.н., доцент, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: dolmatov@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 3887-2405, <https://orcid.org/0000-0003-2969-2971>

Заdernовский Анатолий Андреевич, д.т.н. заведующий кафедрой физики Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: zadernovsky@mirea.ru. ResearcherID B-5463-2016, Scopus Author ID 6602831427, SPIN-код РИНЦ 2345-7791, <https://orcid.org/0000-0002-4017-4836>

Стариковский Анатолий Иванович, к.т.н., профессор, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: starikovski@mirea.ru. Scopus Author ID 57208926243, SPIN-код РИНЦ 1126-4471, <https://orcid.org/0000-0003-4040-3843>

Увайсов Руслан Магомедович, аспирант, кафедра радиоволновых процессов и технологий Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: uvaysov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0619-649X>

About the authors

Vladimir K. Bityukov, Dr. Sci. (Eng.), 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: bitukov@mirea.ru. ResearcherID Y-8325-2018, Scopus Author ID 6603797260, RSCI SPIN-code 3834-5360, <https://orcid.org/0000-0001-6448-8509>

Aleksey V. Dolmatov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Design and Production of Radioelectronic Devices, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: dolmatov@mirea.ru. RSCI SPIN-code 3887-2405, <https://orcid.org/0000-0003-2969-2971>

Anatoly A. Zadernovsky, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Physics Department, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: zadernovsky@mirea.ru. ResearcherID B-5463-2016, Scopus Author ID 6602831427, RSCI SPIN-code 2345-7791, <https://orcid.org/0000-0002-4017-4836>

Anatoly I. Starikovskiy, Cand. Sci. (Eng.), Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: starikovski@mirea.ru. Scopus Author ID 57208926243, RSCI SPIN-code 1126-4471, <https://orcid.org/0000-0003-4040-3843>

Ruslan M. Uvaysov, Postgraduate Student, 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: uvajsov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0619-649X>

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.391.072
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-39-46>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Использование пространственно-распределенной синфазной антенны для повышения помехоустойчивости приема сигналов

Г.В. Куликов,
Ю.А. Полевода[®],
М.С. Костин

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Радиотехнические системы передачи информации находят широкое применение в различных отраслях нашей жизни не только для обеспечения телекоммуникаций и бытовых потребностей человека, но и для функционирования различных спецслужб, например, служб МЧС, которые в своей работе применяют роботизированные комплексы. В случае чрезвычайного происшествия возможно попадание такого робота под завал, в железобетонные трубы или другие коммунальные объекты, в результате чего условия распространения радиоволн резко ухудшаются. В этой связи остро стоит вопрос обеспечения надежной связи с роботизированным комплексом. Цель работы – снижение влияния эффекта многолучевого распространения радиоволн в канале связи в сложных помеховых условиях.

Методы. Используются методы статистической радиотехники, теории оптимального приема сигналов и математического моделирования.

Результаты. Приведена модель приемной многоэлементной пространственно-распределенной синфазной антенны разных конфигураций с электронно-регулируемой диаграммой направленности, предназначенной для борьбы с многолучевым характером распространения сигнала. Проведено моделирование многолучевого канала связи при наличии одного основного и трех отраженных лучей распространения радиоволн, а также с гармонической помехой при двух углах ее прихода и разной частотной расстройкой относительно частоты полезного сигнала. Оценена вероятность битовой ошибки при приеме дискретной информации с применением предложенной антенны.

Выводы. Применение предложенного алгоритма обработки сигналов на приемной стороне позволяет частично скомпенсировать влияние эффекта многолучевости. В результате помехоустойчивость приема информации по сравнению с приемом на всенаправленную антенну с одним антенным элементом повышается: для вероятности битовой ошибки 10^{-3} энергетический выигрыш составляет от 2 дБ при 2 лучах до 7–10 дБ при 3–4 лучах. При наличии в радиоканале сосредоточенной гармонической помехи также наблюдается ее одновременная пространственная (с использованием антенны) и спектральная (с использованием демодулятора) фильтрация, эффективность которой зависит от направления прихода и частотной расстройки помехи, что также приводит к существенному снижению вероятности ошибки.

Ключевые слова: пространственно-распределенная синфазная антенна, электронное регулирование диаграммы направленности, многолучевое распространение радиоволн, гармоническая помеха, помехоустойчивость, вероятность битовой ошибки

• Поступила: 14.04.2023 • Доработана: 02.05.2023 • Принята к опубликованию: 04.09.2023

Для цитирования: Куликов Г.В., Полевода Ю.А., Костин М.С. Использование пространственно-распределенной синфазной антенны для повышения помехоустойчивости приема сигналов. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):39–46. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-39-46>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Use of a spatially distributed in-phase antenna to increase the noise immunity of signal reception

Gennady V. Kulikov,
Yuriy A. Polevoda[@],
Mikhail S. Kostin

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: polevoda@mirea.ru

Abstract

Objectives. Radio-technical information transmission systems are widely used in various sectors of our life, not only for telecommunications and associated domestic needs, but also for the functioning of various special services, such as emergency response units, which increasingly use robotic complexes in the course of their work. In the event of an emergency, robot devices can be used to get in under rubble, in concrete pipes or other municipal facilities, which typically result in a sharp deterioration of the necessary conditions for the propagation of radio waves. In this regard, the problem of ensuring reliable communication with the robotic complex becomes rather acute. The aim of the present work is to reduce the effect of multipath propagation of radio waves in the communication channel under complex interference conditions.

Methods. The methods of statistical radio engineering and mathematical modeling are used according to optimal signal reception theory.

Results. The presented model for a multi-element, spatially-distributed, in-phase receiving antenna of various configurations, featuring an electronically adjustable radiation pattern, is designed to ameliorate the multipath nature of signal propagation. A simulation of a multipath communication channel was carried out in the presence of one main and three reflected beams of radio wave propagation, as well as with harmonic interference at two angles of its arrival and different frequency detuning relative to the frequency of the useful signal. The probability of a bit error when receiving discrete information using the proposed antenna is estimated.

Conclusions. The proposed signal processing algorithm on the receiving side can be used to partially compensate for the influence of the multipath effect. As a result, the noise immunity of information reception in comparison with reception on an omnidirectional antenna with one antenna element increases: for a bit error probability of 10^{-3} , the energy gain ranges from 2 dB for two beams to 7–10 dB for three or four beams. In the presence of concentrated harmonic interference in the radio channel, its simultaneous spatial (by the antenna) and spectral (by the demodulator) filtering is also observed, the effectiveness of which depends on the direction of arrival and the frequency detuning of the interference, which also leads to a significant decrease in the error probability.

Keywords: spatially distributed in-phase antenna, electronic beam control, multipath propagation of radio waves, harmonic interference, noise immunity, bit error rate

• Submitted: 14.04.2023 • Revised: 02.05.2023 • Accepted: 04.09.2023

For citation: Kulikov G.V., Polevoda Yu.A., Kostin M.S. Use of a spatially distributed in-phase antenna to increase the noise immunity of signal reception. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):39–46. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-39-46>

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

Радиотехнические системы передачи информации находят широкое применение в различных отраслях нашей жизни не только для обеспечения телекоммуникаций и бытовых потребностей человека, но и для функционирования различных спецслужб, например, служб МЧС, которые в своей работе применяют роботизированные комплексы. В случае чрезвычайного происшествия возможно попадание такого робота под завал, в железобетонные трубы или другие коммунальные объекты, в результате чего условия распространения радиоволн резко ухудшаются. В этой связи остро стоит вопрос обеспечения надежной связи с роботизированным комплексом в сложных помеховых условиях.

Среда распространения радиоволн существенно влияет на проходящие через нее сигналы. Помимо аддитивных шумовых помех в канале связи наблюдаются сосредоточенные помехи от других радиосредств и ретранслированные помехи, которые вызваны многолучевостью распространения радиоволн при их отражении от препятствий и преломлении [1–3]. Формирование такого многолучевого канала связи приводит к искажению параметров полезного радиосигнала: наблюдается изменение его амплитуды, фазы, угла прибытия, что в результате приводит к существенному снижению помехоустойчивости приема информации [4–10].

Существуют различные методы борьбы с многолучевостью в канале связи – это применение канальных эквалайзеров, управление диаграммой направленности (ДН) антенны, увеличение интервалов в передаваемой последовательности импульсов и применение систем разнесенного приема. Одной из таких систем, например, является система ММО (multiple input – multiple output) [11], широко используемая в системах беспроводных локальных сетей различных стандартов, а также в беспроводных системах мобильной связи.

Другим эффективным способом борьбы с многолучевостью в каналах связи является использование направленных антенн и антенных систем, позволяющих осуществлять пространственную

фильтрацию принимаемых сигналов. При этом ДН таких антенн формируются либо конструктивными методами, либо специальными методами обработки принимаемых сигналов [12].

Синфазная антенная решетка представляет собой сложную направленную антенную систему, состоящую из отдельных слабонаправленных антенн, разнесенных в пространстве и расположенных таким образом, что фазы наведенных в них сигналов оказываются одинаковыми. В итоге сигналы, поступающие от каждой антенны в нагрузку, складываются синфазно.

Это, в конечном итоге, приводит к увеличению уровня сигнала на выходе антенной системы, сужению ДН и в результате – к увеличению коэффициента усиления по сравнению с коэффициентом усиления одиночной антенны, входящей в состав решетки.

МОДЕЛЬ СИНФАЗНОЙ АНТЕННЫ С ЭЛЕКТРОННО-РЕГУЛИРУЕМОЙ ДН

Для снижения влияния эффекта многолучевого распространения радиоволн в канале связи с роботизированным комплексом в сложных помеховых условиях можно использовать пространственно распределенную антенную систему, содержащую от $N = 2$ до 8 антенных элементов [13].

Такая синфазная антенная система (рис. 1) состоит из антенных элементов – резонаторов 1–8, электронно-регулируемых элементов задержки 9–16 и синфазного сумматора 17. Антенные элементы – резонаторы расположены равномерно с угловым шагом $2\pi/N$ по кругу диаметра, равного половине длины волны принимаемого сигнала $\lambda/2$. Сигналы с антенных элементов поступают через регулируемые элементы задержки на синфазный сумматор, формирующий результирующий сигнал $S_{\text{вых}}$. Задачей регулируемых элементов задержки является обеспечение синфазности принимаемых колебаний и формирование суммарной ДН антенны.

Временные задержки прихода принимаемых колебаний от антенных элементов на синфазный сумматор с учетом требуемого поворота ДН на угол φ определяются следующим образом:

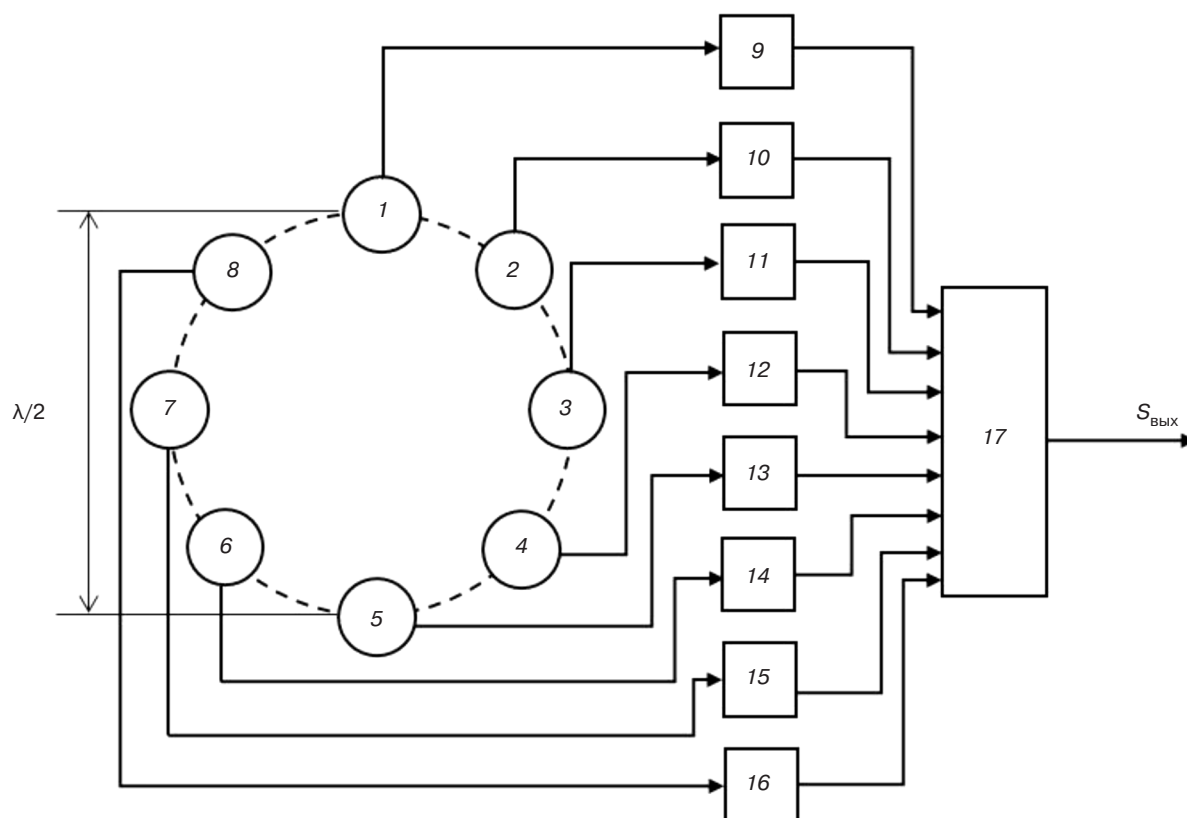


Рис. 1. Структурная схема синфазной антенной решетки с электронно-регулируемой ДН

$$\tau_i = \frac{T}{4} \left\{ 1 + \sin \left[\left(\frac{\pi}{2} - \frac{i\pi}{4} \right) + \varphi \right] \right\}, \quad (1)$$

где $i = \overline{1,8}$ – номер антенного элемента системы, T – период волны принимаемого сигнала.

В [14, 15] рассчитаны ДН рассматриваемой синфазной антенны для трех случаев: номинальная частота принимаемого сигнала, уменьшенная или увеличенная частота. Показано, как при изменении частоты меняется ширина ДН и уровень боковых лепестков. Из полученных графиков следует, что конструктивно простые двухэлементные антенны

имеют довольно широкую ДН и очень большой уровень боковых лепестков. Четырехэлементная и восьмиэлементная антенны имеют хорошие, весьма близкие показатели и могут быть использованы для пространственной фильтрации в каналах с многолучевым распространением волн. Можно отметить, что при отклонении частоты сигнала от номинальной даже на 10% селективные свойства этих антенн остаются в норме.

Возможность электронного регулирования ДН антенны демонстрируется на рис. 2, где показаны характеристики направленности при различных величинах угла φ , задаваемого в элементах

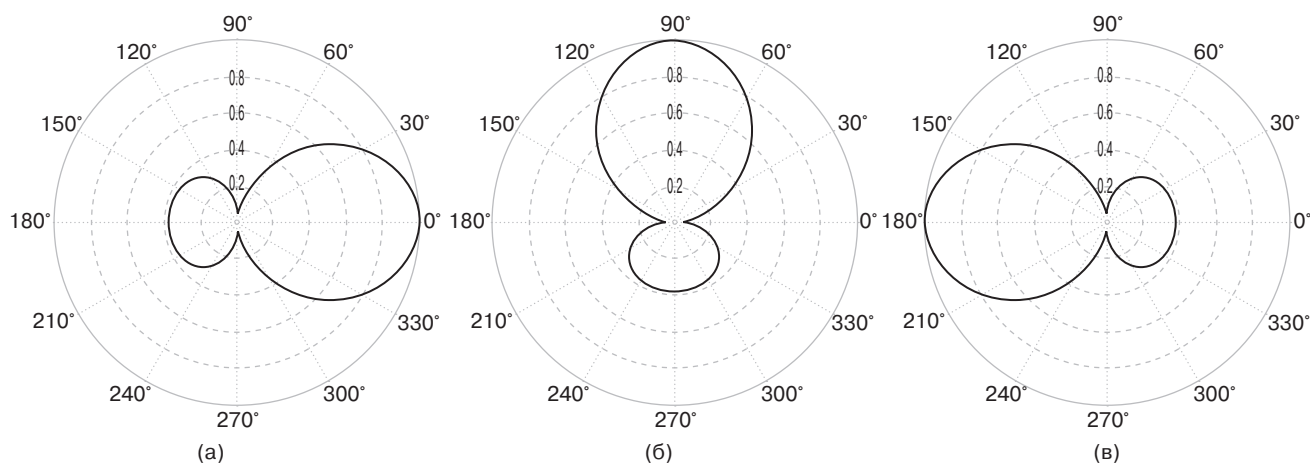


Рис. 2. ДН синфазной антенны: (а) $\varphi = 0$, (б) $\varphi = \pi/2$, (в) $\varphi = \pi$

задержки (1). Стоит отметить, что при различных углах поворота сама форма диаграммы, а следовательно, и избирательные свойства остаются без изменений.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки помехоустойчивости системы связи с предлагаемой синфазной антенной на приемной стороне в сложных помеховых условиях проведено математическое моделирование.

А. Модели сигнала и помех. В качестве тестового использован сигнал с бинарной фазовой манипуляцией $s(t) = A_0 \cos(\omega_0 + C_k \pi)$, где $A_0 = \sqrt{2E/T_s}$ – его амплитуда, ω_0 – несущая частота, t – время, $C_k = \pm 1$ – информационный символ, E – энергия сигнала, T_s – длительность посылки. Был использован когерентный демодулятор. В качестве флуктуационной помехи использовался гауссовский шум с равномерной спектральной плотностью N_0 . Канал связи полагался многолучевым с одним основным и несколькими ($M = 1, 2, 3$) ретранслированными лучами

$$s_r(t) = \mu_r s(t - \tau_r)$$

с разной относительной интенсивностью μ_r , временной задержкой τ_r и углами прихода θ_r . Кроме этого, в качестве сосредоточенной помехи использовалось гармоническое колебание $s_h(t) = \mu_h A_0 \cos(\omega_h t + \varphi_h)$ со случайной фазой φ_h , относительной интенсивностью μ_h и частотой ω_h , близкой к частоте полезного сигнала, с разными углами прихода θ_h .

Б. Многолучевой канал связи. При моделировании многолучевого канала связи использовались один основной (угол прихода $\theta_r = 0$) и 3 отраженных луча: для первого отраженного луча $\theta_r = \pi/4$, $\mu_r = 0.5$, $\tau_r = 0.5T_s$; для второго отраженного луча $\theta_r = \pi/3$, $\mu_r = 0.3$, $\tau_r = 0.1T_s$; для третьего отраженного луча $\theta_r = \pi/5$, $\mu_r = 0.4$, $\tau_r = 0.7T_s$. Отношение сигнал/шум E/N_0 изменялось в интервале от 1 до 13 дБ.

На рис. 3 показаны полученные зависимости вероятности битовой ошибки P_e от отношения сигнал/шум (С/Ш) при разном количестве принимаемых лучей, включая основной. Кривые 1 соответствуют синфазной антенне с четырьмя антенными элементами; кривые 2 – с восемью антенными элементами; кривые 3 – простой всенаправленной антенне с одним антенным элементом; кривые 4 – простой всенаправленной антенне с одним антенным элементом и одним основным принимаемым лучом (классический случай приведен для сравнения). Видно, что наличие отраженных лучей при приеме существенно увеличивает вероятность битовой ошибки по сравнению с классическим случаем, но применение предложенной синфазной антенны позволяет

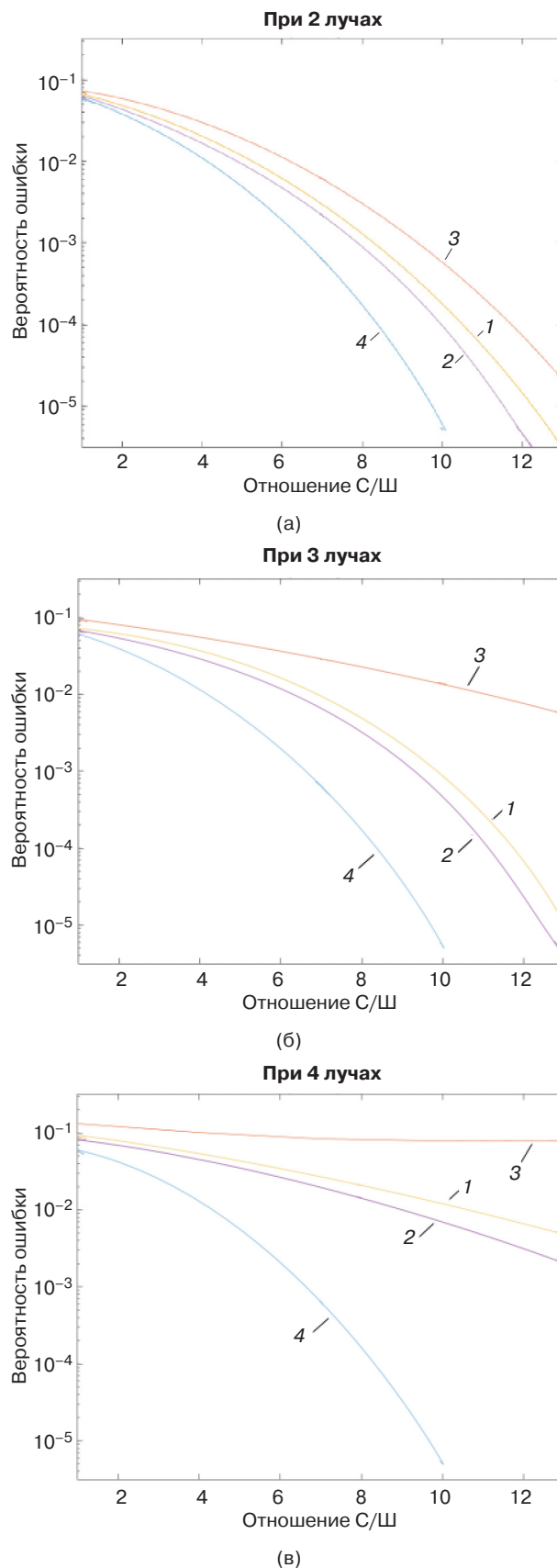


Рис. 3. Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения С/Ш для: (а) двухлучевого канала связи, (б) трехлучевого канала связи, (в) четырехлучевого канала связи

частично скомпенсировать их влияние. В результате помехоустойчивость приема информации по сравнению с приемом на всенаправленную антенну с одним антенным элементом повышается. Для вероятности ошибки $P_e = 10^{-3}$ энергетический выигрыш составляет от 1.5–2 дБ при 2 лучах до 7–10 дБ при 3–4 лучах, причем заметно, что разница для четырехэлементной и восьмиэлементной антенн небольшая, что говорит о возможности упрощения ее конструкции.

В. Канал связи с гармонической помехой. При моделировании канала связи использовались следующие параметры гармонической помехи: относительная интенсивность $\mu_h = 0.5$, случайная начальная фаза φ_h равномерно распределена на интервале $(-\pi, \pi]$, приведенная частотная расстройка $\Delta\omega T_s = (\omega_h - \omega_0)T_s$ находится в интервале $(-12, +12)$. Синфазная антенна содержит 8 антенных элементов.

На рис. 4 показаны зависимости вероятности битовой ошибки P_e от расстройки помехи $\Delta\omega T_s$ при $E/N_0 = 7$ дБ и двух углах ее прихода: $\theta_h = 0$ (направление максимума ДН) и $\pi/3$. Наблюдается одновременная пространственная (с использованием антенны) и спектральная (с использованием демодулятора) фильтрация помехи, что приводит к существенному снижению вероятности ошибки – более чем на порядок при $\theta_h = 0$. Можно считать, что при $\Delta\omega T_s \geq 5$ влиянием такой гармонической помехи можно пренебречь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе построена математическая модель многоэлементной пространственно-распределенной синфазной антенны, предназначенной для борьбы с многолучевым характером распространения сигнала. Показана возможность электронной регулировки ДН.

Применение предложенного алгоритма обработки сигналов на приемной стороне позволяет частично скомпенсировать влияние эффекта многолучевости. В результате помехоустойчивость приема информации по сравнению с приемом на всенаправленную

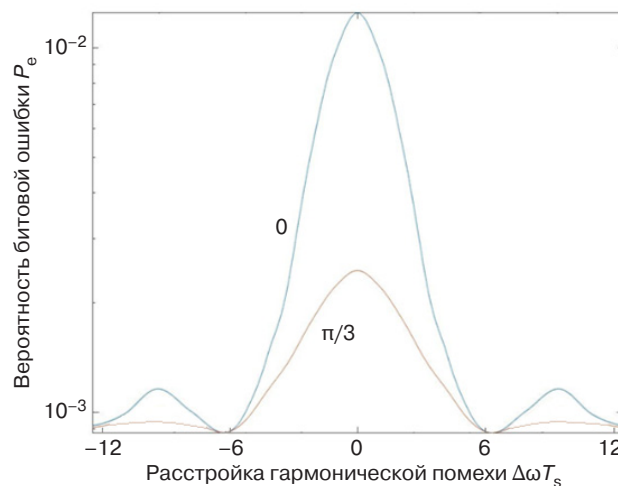


Рис. 4. Зависимости вероятности битовой ошибки от расстройки гармонической помехи

антенну с одним антенным элементом повышается: для вероятности ошибки $P_e = 10^{-3}$ энергетический выигрыш составляет от 2 дБ при 2 лучах до 7–10 дБ при 3–4 лучах.

При наличии в радиоканале сосредоточенной гармонической помехи также наблюдается ее одновременная пространственная (с использованием антенны) и спектральная (с использованием демодулятора) фильтрация, эффективность которой зависит от направления прихода и частотной расстройки помехи, что также приводит к существенному снижению вероятности ошибки.

Вклад авторов

Г.В. Куликов – идея исследования, консультации по вопросам проведения всех этапов исследования.

Ю.А. Полеводо – проведение компьютерного моделирования, обработка результатов.

М.С. Костин – разработка модели синфазной антенны.

Authors' contributions

G.V. Kulikov – the research idea, consultations on the issues of conducting all stages of the study.

Yu.A. Polevoda – computer simulation, processing of results.

M.S. Kostin – development of an antenna model.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перфилов О.Ю. *Радиопомехи*. М.: Горячая линия – Телеком; 2017. 110 с. ISBN 978-5-9912-0491-0
2. Поляков П.Ф. *Прием сигналов в многолучевых каналах*. М.: Радио и связь; 1986. 248 с.
3. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г. *Распространение радиоволн*. М.: ЛЕНАНД; 2009. 486 с. ISBN 978-5-9710-0183-6

REFERENCES

1. Perfilov O.Yu. *Radiopomekhi (Radio Interference)*. Moscow: Goryachaya Liniya – Telekom; 2017. 110 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9912-0491-0
2. Polyakov P.F. *Priem signalov v mnogoluchevykh kanalah (Signal Reception in Multipath Channels)*. Moscow: Radio i svyaz'; 1986. 248 p. (in Russ.).

4. Куликов Г.В., Лелюх А.А., Граченко Е.Н. Помехоустойчивость когерентного приемника сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией при наличии ретранслированной помехи. *Радиотехника и электроника*. 2020;65(8):804–808. <https://doi.org/10.31857/S0033849420070074>
5. Куликов Г.В., Данг С.Х. Помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией в двухлучевом канале связи. *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. 2022;2:43–49.
6. Нгуен В.З. Помехоустойчивость корреляционного приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при наличии ретранслированной помехи. *Журнал радиоэлектроники*. 2019;3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.3.4>
7. Зеленецкий В.В., Попов А.В., Зеленецкий Ю.В., Наконечный А.Б. Статистическая оценка качества райсовского радиоканала метрового диапазона. *Известия Института инженерной физики*. 2023;1(67): 56–58. URL: <https://iifrf.ru/wp-content/uploads/2023/01/izvestiyaiif-67.pdf>
8. Красносельский И.Н., Канев С.А. Исследование помехоустойчивости системы DVB-T на модели канала с многолучевым распространением. *Электросвязь*. 2010;7:28–30.
9. Сидельников Г.М., Огнев Д.В. Помехоустойчивость разнесенного приема сигналов с фазовой и относительной фазовой модуляцией в каналах с многолучевостью. *Омский научный вестник*. 2018;2(158):104–109. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-158-104-109>
10. Сидельников Г.М., Синявская А.С. Межсимвольная интерференция сигналов с ФРМ и ФМ в каналах с дискретной многолучевостью. *Омский научный вестник*. 2014;1(127):205–210.
11. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б. *Технология ММО: принципы и алгоритмы*. М.: Горячая линия – Телеком; 2022. 242 с. ISBN 978-5-9912-0457-6
12. Гончаренко И.В. *Антенны КВ и УКВ. Направленные КВ антенны. Синфазные и продольного излучения*. М.: РадиоСофт: Радио; 2010. 256 с. ISBN 5-93037-144-X
13. Куликов Г.В., Костин М.С., Замуруев С.Н., Ярлыков А.Д., Полевода Ю.А. *Синфазная антенная решетка с электронно-регулируемой диаграммой направленности*: пат. RU 217728 U1. Заявка № RU 2023 102 773 U; заявл. 07.02.2023; опубл. 14.04.2023.
14. Полевода Ю.А., Куликов Г.В., Коняшкин Г.В., Кузленков П.И. Исследование диаграммы направленности пространственно-распределенной приемной антенны. В сб.: *Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: сборник трудов Национальной научно-практической конференции*; под ред. С.У. Увайсова. М.: РТУ МИРЭА; 2022. С. 272–277.
15. Куликов Г.В., Кузленков П.И. Математическое моделирование системы антенн для борьбы с многолучевым характером распространения сигнала в гидроакустическом канале связи. В сб.: *VI Международная НПК «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» (РАДИОИНФОКОМ – 2022)*. М.: РТУ МИРЭА; 2022. С. 164–167.
3. Yakovlev O.I., Yakubov V.P., Uryadov V.P., Pavel'ev A.G. *Rasprostranenie radiovoln (Radio-Wave Propagation)*. Moscow: LENAND; 2009. 486 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9710-0183-6
4. Kulikov G.V., Lelyukh A.A., Grachenko E.N. Noise immunity of coherent signal receiver with quadrature amplitude modulation in the presence of relayed interference. *J. Commun. Technol. Electron.* 2020;65(8):934–938. <https://doi.org/10.1134/S1064226920070074> [Original Russian Text: Kulikov G.V., Lelyukh A.A., Grachenko E.N. Noise immunity of coherent signal receiver with quadrature amplitude modulation in the presence of relayed interference. *Radiotekhnika i Elektronika*. 2020;65(8):804–808 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0033849420070074>]
5. Kulikov G.V., Dang X.H. Noise immunity of reception of signal with amplitude-phase shift keying in a two-path communication channel. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya = Questions of Radio Electronics. Series: TV Technique*. 2022;2:43–49 (in Russ.).
6. Nguyen V.D. Noise immunity of correlation receiver of signal with multi-position phase shift keying in the presence of retransmitted interference. *Zhurnal radioelektroniki = J. Radio Electronics*. 2019;3 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.3.4>
7. Zelenevskii V.V., Popov A.V., Zelenevskii Yu.V., Nakonechnyi A.B. Statistical quality assessment Rice radio channel of meter band. *Izvestiya Instituta Inzhenernoi Fiziki*. 2023;1(67):56–58 (in Russ.). Available from URL: <https://iifrf.ru/wp-content/uploads/2023/01/izvestiyaiif-67.pdf>
8. Krasnoselsky I.N., Kanev S.A. Analyzing DVB-T system's interference immunity in a multipath fading channel as a model. *Elektrosvyaz' = Telecommunications and Radio Engineering*. 2010;7:28–30 (in Russ.).
9. Sidelnikov G.M., Ognev D.V. Noise stability of diversity system for signals PSK and DPSK in multipath channels. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2018;2(158):104–109 (in Russ.). <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-158-104-109>
10. Sidelnikov G.M., Sinyavskaya A.S. Intersymbol interference of signal PSK and DPSK for discrete channels. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2014;1(127):205–210 (in Russ.).
11. Bakulin M.G., Varukina L.A., Kreindelin V.B. *Tekhnologiya MIMO: printsipy i algoritmy (MIMO Technology: Principles and Algorithms)*. Moscow: Goryachaya Liniya – Telekom; 2022. 242 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9912-0457-6
12. Goncharenko I.V. *Antennы KV i UKV. Napravlenные KV anteny. Sinfaznye i prodol'nogo izlucheniya (Antennas of SW and VHF. Directional SW Antennas. In-phase and Longitudinal Radiation)*. Moscow: RadioSoft: Radio; 2010. 256 p. (in Russ.). ISBN 5-93037-144-X
13. Kulikov G.V., Kostin M.S., Zamuruev S.N., Yarlykov A.D., Polevoda Yu.A. *In-phase antenna array with an electronically adjustable directional pattern*: RF Pat. RU 217728 U1. Publ. 14.04.2023 (in Russ.).

14. Polevoda Yu.A., Kulikov G.V., Konyashkin G.V., Kuzelenkov P.I. Research of the directional pattern of the spatially distributed receiving antenna. In: *Fundamental, Exploratory, Applied Research and Innovation Projects: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference*. Moscow: RTU MIREA; 2022. P. 272–277 (in Russ.).
15. Kulikov G.V., Kuzelenkov P.I. Mathematical Modelling of Antenna System for Combating Multi-Beam Character of Signal Propagation in Hydroacoustic Communication Channel. In: *Actual Problems and Prospects of Development of Radio Engineering and Infocommunication Systems (RADIOINFOCOM 2022): Proceedings VI International Conference*. Moscow: RTU MIREA; 2022. P. 164–167 (in Russ.).

Об авторах

Куликов Геннадий Валентинович, д.т.н., профессор, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, SPIN-код РИНЦ 2844-8073, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

Полехова Юрий Александрович, аспирант, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: polevoda@mirea.ru. <https://orcid.org/0009-0007-6327-9685>

Костин Михаил Сергеевич, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой радиоволновых процессов и технологий кафедры 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>

About the authors

Gennady V. Kulikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, RSCI SPIN-code 2844-8073, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

Yuriy A. Polevoda, Postgraduate Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: polevoda@mirea.ru. <https://orcid.org/0009-0007-6327-9685>

Mikhail S. Kostin, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the 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: kostin_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671, RSCI SPIN-code 5819-2178, <http://orcid.org/0000-0002-5232-5478>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 629.78
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-47-56>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Математическое моделирование полей скоростей и ускорений движения изображения в оптической аппаратуре спутника дистанционного зондирования Земли

С.Ю. Горчаков[@]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. В статье рассматривается спутник с оптико-электронной аппаратурой, предназначенной для съемки поверхности Земли. Цель статьи – разработка математической модели для определения зависимостей между вектором состояния спутника, вектором состояния снимаемой точки на земной поверхности и полями распределений векторов скоростей и ускорений движения изображения по фокальной плоскости оптико-электронной аппаратуры.

Методы. Используемый метод основан на двойном дифференцировании уравнения фотограмметрии при применении его к съемке поверхности Земли из космоса. Для построения модели орбитального и углового движений спутника применяются дифференциальные уравнения с численным интегрированием. Параметры вращения Земли и движения земной поверхности вычисляются на основе библиотеки программ Standards of Fundamental Astronomy.

Результаты. Получены дифференциальные уравнения движения изображения. Проведена верификация разработанной математической модели. Проведено моделирование движения спутника в режиме орбитальной ориентации и в режиме компенсации скорости движения изображения. Построены поля распределения векторов скоростей и ускорений движения изображения поверхности Земли. Исследовано остаточное поле движения изображения после компенсации.

Выводы. Предложенная математическая модель может найти применение как на этапе проектирования спутника с оптико-электронной аппаратурой при моделировании режимов съемки и оценках смещений изображения, так и на этапе эксплуатации спутника при применении представленной модели в бортовом программном обеспечении спутника. Представленные зависимости также можно использовать для построения матрицы сдвига изображения в задачах восстановления изображения и получения сверхразрешения.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, спутник, изображения ландшафтов Земли, математическая модель, поле скоростей движения изображения, поле ускорений движения изображения, сверхразрешение

• Поступила: 25.07.2022 • Доработана: 04.05.2023 • Принята к опубликованию: 07.09.2023

Для цитирования: Горчаков С.Ю. Математическое моделирование полей скоростей и ускорений движения изображения в оптической аппаратуре спутника дистанционного зондирования Земли. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):47–56. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-47-56>

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Mathematical modeling of velocity and accelerations fields of image motion in the optical equipment of the Earth remote sensing satellite

Sergei Yu. Gorchakov[@]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. The paper considers a satellite with an optoelectronic payload designed to take pictures of the Earth's surface. The work sets out to develop a mathematical model for determining the dependencies between the state vector of the satellite, the state vector of the point being imaged on the Earth's surface, and the distribution fields of the velocity vectors and accelerations of the motion of the image along the focal plane of the optoelectronic payload.

Methods. The method is based on double differentiation of the photogrammetry equation when applied to a survey of the Earth's surface from space. For modeling the orbital and angular motion of the satellite, differential equations with numerical integration were used. The motion parameters of the Earth's surface were calculated based on the Standards of Fundamental Astronomy software library.

Results. Differential equations of motion of the image were obtained. Verification of the developed mathematical model was carried out. The motion of the considered satellite was simulated in orbital orientation mode using an image velocity compensation model. The distribution fields of velocity vectors and accelerations of motion of the image of the Earth's surface were constructed. The residual motion of the field of image following compensation was investigated.

Conclusions. The proposed mathematical model can be used both with an optoelectronic payload when modeling shooting modes and estimating image displacements at the design stage of a satellite, as well as at the satellite operation stage when incorporating the presented model in the onboard satellite software. The presented dependencies can also be used to construct an image transformation matrix, both when restoring an image and when obtaining a super-resolution.

Keywords: remote sensing of the Earth, satellite, images of Earth's landscapes, mathematical model, image velocity field, image acceleration field, super-resolution

• Submitted: 25.07.2022 • Revised: 04.05.2023 • Accepted: 07.09.2023

For citation: Gorchakov S.Yu. Mathematical modeling of velocity and accelerations fields of image motion in the optical equipment of the Earth remote sensing satellite. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):47–56. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-47-56>

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 статье рассматривается спутник со съемочной оптико-электронной аппаратурой (ОЭА) высокого разрешения с фоточувствительными приборами с зарядовой связью (ФПЗС), работающими в режиме временной задержки и накопления (ВЗН) заряда (time delay and integration). Технология ВЗН основана на многократной экспозиции одного и того же объекта, что существенно повышает соотношение сигнал/шум и может находить применение при сканировании сцен с низкой освещенностью, но накладывает ограничения на ее применение: необходимо обеспечить движение проецируемого изображения объекта в соответствии с движением зарядовых пакетов на фотоприемниках¹.

Точность, с которой известна скорость движения изображения (СДИ), резко ограничивает использование технологии ВЗН. Необходимо обеспечить такие поля векторов СДИ на ФПЗС, чтобы накопленный сдвиг за время экспозиции не превышал $\sim 1/3$ пиксела [1].

Из основных составляющих суперпозиции движения зарядовых пакетов по ФПЗС за время экспозиции выделяют орбитальное и угловое движения спутника, кривизну поверхности Земли и ее вращение, погрешности функционирования системы управления ориентацией и стабилизацией (СУОС) спутника.

Вопросами вычисления СДИ занимались многие авторы. Вычисление полей СДИ рассмотрено в [2–4]. Так, в работах [2, 3, 5] рассмотрены задачи вычисления поля СДИ, когда спутник движется в центральном гравитационном поле.

Компенсация полей СДИ рассмотрена в [6–9]. В этих работах обсуждается способ обеспечения требуемой (опорной) СДИ при помощи вращательного движения спутника в соответствии с специальным программным законом управления ориентацией и стабилизацией².

¹ Hang Y. *Time-Delay-Integration CMOS Image Sensor Design for Space Applications*: Ph.D. Thesis. Nanyang Technological University; 2016.

² Галкина А.С. *Синтез программ управления угловым движением космического аппарата для съемки криволинейных маршрутов*: дис. ... канд. техн. наук. Самара; 2011. 143 с. [Galkina A.S. *Synthesis of the Spacecraft Angular Motion Control Programs for Surveying Curvilinear Routes*. Diss. ... Cand. Sci. (Eng.). Samara; 2011. 143 p. (in Russ.).]

Автор делает допущение, что при наличии компенсации могут возникать отклонения фактической СДИ от требуемой, например, по причине несанкционированных разворотов спутника за счет погрешностей при функционировании СУОС, возможных вибраций конструкции спутника, а также при сканировании без учета рельефа местности.

Настоящая статья направлена на разработку общей математической модели вычисления полей векторов скоростей и ускорений движения изображения (СДИ и УДИ) с учетом основных динамических и кинематических факторов процесса съемки, а также на оценку остаточных полей СДИ и УДИ при наличии компенсации. В представленной математической модели вычисления СДИ, в отличие от [2, 3, 5], могут быть учтены основные динамические воздействия внешних и внутренних сил и крутящих моментов, которые действуют на тело спутника.

Полученные результаты могут быть использованы при составлении матрицы сдвига поля изображения для решения задачи получения сверхразрешения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Составим математическую модель сканирования поверхности Земли из космоса со следующими допущениями:

1. Модель спутника – абсолютно твердое тело, которое движется по орбите вокруг Земли с моделью гравитационного поля EGM2008 [10].
2. Модель бортовой ОЭА спутника – абсолютно твердое тело с фокусным расстоянием f и фокальной плоскостью (ФП) с размерами a и b .
3. Модель Земли – эллипсоид с параметрами WGS84³.
4. Используемые системы координат: небесная геоцентрическая инерциальная система координат [11] (GCRS – geocentric celestial reference system); земная геоцентрическая система координат [11] (ITRS – international terrestrial reference system); локально вертикальная – локально горизонтальная (или орбитальная)

³ https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Reference_Frames_in_GNSS. Дата обращения 23.08.2023. / Accessed August 23, 2023.

система координат [12] LVLH – local-vertical, local-horizontal; OF – orbital frame); связанная (или строительная) система координат спутника (BF – body frame); система координат ФП ОЭА (FPF – focal plane frame). Для записи уравнений движения спутника будем использовать инерциальную квазинеподвижную систему координат GCRS. При записи дифференциальных уравнений движения спутника во вращающейся системе координат ITRS потребуются учет прецессии и нутации Земли в уравнениях движения. Учет прецессии, нутации и движения полюсов Земли, а также параметров перехода между шкалами времени TAI и UTC (TAI – International Atomic Time, UTC – Coordinated Universal Time) будет включен в соответствующие матрицы в модели вращения Земли при помощи пакета программ, представленного SOFA (Standards of Fundamental Astronomy) [13, 14].

- Используемые шкалы времени: международное атомное время (TAI) и универсальное координированное время (UTC) [11].

Необходимо определить следующие функциональные зависимости:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{x,y} &= \dot{\mathbf{x}}_{x,y} = f(\mathbf{r}_{\text{sat}}, \mathbf{v}_{\text{sat}}, \mathbf{q}_{\text{sat}}, \mathbf{w}_{\text{sat}}, \mathbf{r}_e, \mathbf{v}_e, \mathbf{a}_e); \\ \mathbf{a}_{x,y} &= \ddot{\mathbf{x}}_{x,y} = f(\mathbf{r}_{\text{sat}}, \mathbf{v}_{\text{sat}}, \dot{\mathbf{v}}_{\text{sat}}, \mathbf{q}_{\text{sat}}, \mathbf{w}_{\text{sat}}, \dot{\mathbf{w}}_{\text{sat}}, \mathbf{r}_e, \mathbf{v}_e, \mathbf{a}_e), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{v}_{x,y}$ – вектор СДИ в точке с координатами x и y на ФП; $\mathbf{a}_{x,y}$ – вектор УДИ; $\mathbf{r}_{\text{sat}}, \mathbf{v}_{\text{sat}}, \dot{\mathbf{v}}_{\text{sat}}$ – положение, скорость и ускорение спутника в GCRS; $\mathbf{q}_{\text{sat}}, \mathbf{w}_{\text{sat}}, \dot{\mathbf{w}}_{\text{sat}}$ – кватернион ориентации, угловая скорость и угловое ускорение спутника в BF; $\mathbf{r}_e, \mathbf{v}_e, \mathbf{a}_e$ – положение, скорость и ускорение сканируемой точки на поверхности Земли.

На рис. 1 представлена схема, поясняющая постановку задачи.

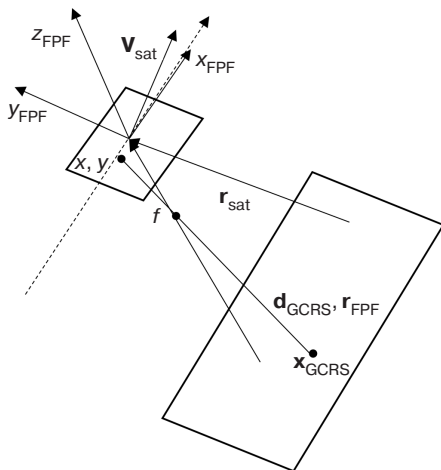


Рис. 1. К постановке задачи

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЪЕМКИ

Согласно фундаментальному уравнению космической фотограмметрии, связь между FPF и GCRS с учетом масштаба (в пространстве изображения) определяется с использованием системы уравнений коллинеарности [15], выраженных в проекциях на оси FPF:

$$x = fXZ^{-1}; y = fYZ^{-1}, \quad (2)$$

где x, y – координаты точки изображения в FPF (в пространстве изображений).

Определим вектор дальности $\mathbf{r}_{\text{FPF}}$, выраженный в системе координат FPF (в пространстве предметов), с использованием следующей зависимости:

$$\mathbf{r}_{\text{FPF}} = \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{FPF}} \mathbf{d}_{\text{GCRS}}, \quad (3)$$

где $\mathbf{d}_{\text{GCRS}}$ – вектор дальности сканирования в GCRS, соединяющий точку на ФП и снимаемую точку на поверхности Земли; $\mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{FPF}} = \mathbf{M}_{\text{BF}}^{\text{FPF}} \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{BF}}$ – матрица преобразования из GCRS в FPF; $\mathbf{M}_{\text{BF}}^{\text{FPF}}$ – матрица преобразования из BF в FPF; $\mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{BF}}$ – матрица преобразования из GCRS в BF (матрица ориентации спутника).

Уравнения (2) и (3) и описывают процесс, когда объект съемки и ФП неподвижны: координаты x, y , вектор $\mathbf{d}_{\text{GCRS}}$ и матрица $\mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{FPF}}$ – неизменны. Так как сканирование поверхности Земли из космоса происходит во времени, то все составляющие в указанных уравнениях являются функциями времени.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ

С целью отыскания вектора СДИ в точке ФП продифференцируем выражение (2) по времени:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{d}{dt} fXZ^{-1} + f \frac{d}{dt} (XZ^{-1}); \\ \dot{y} &= \frac{d}{dt} fYZ^{-1} + f \frac{d}{dt} (YZ^{-1}). \end{aligned}$$

Первое слагаемое $\frac{d}{dt} fXZ^{-1} = 0$, т.к. в рамках решаемой задачи фокусное расстояние является постоянной величиной. Тогда:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f \frac{d}{dt} (XZ^{-1}) = f \frac{V_x Z - X V_z}{Z^2} = (fV_x - xV_z) Z^{-1}; \\ \dot{y} &= f \frac{d}{dt} (YZ^{-1}) = f \frac{V_y Z - Y V_z}{Z^2} = (fV_y - yV_z) Z^{-1}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $V_x = \frac{d}{dt} X$ и $V_y = \frac{d}{dt} Y$.

Для определения вектора $\mathbf{v}_{\text{FPF}} = \{O_{\text{FPF}}, V_x, V_y, V_z\}$ продифференцируем выражение (3):

$$\mathbf{v}_{\text{FPF}} = \frac{d}{dt} \mathbf{r}_{\text{FPF}} = \frac{d}{dt} \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{FPF}} \mathbf{d}_{\text{GCRS}} + \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{FPF}} \frac{d}{dt} \mathbf{d}_{\text{GCRS}}. \quad (5)$$

Определим производную от матрицы преобразования $\mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{FPF}}$:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{FPF}} = \frac{d}{dt} \mathbf{M}_{\text{BF}}^{\text{FPF}} \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{BF}} + \mathbf{M}_{\text{BF}}^{\text{FPF}} \frac{d}{dt} \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{BF}}.$$

В полученном уравнении первое слагаемое обращается в ноль, т.к. по условиям постановки задачи отсутствует вращение между FPF и BF (ФП и конструкцией спутника).

Тогда после подстановки уравнения Пуассона [5]

$$\frac{d}{dt} \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{FPF}} = -\mathbf{W}_x \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{FPF}} \text{ из (5) получаем:}$$

$$\mathbf{v}_{\text{FPF}} = \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{FPF}} \frac{d}{dt} \mathbf{d}_{\text{GCRS}} - \mathbf{M}_{\text{BF}}^{\text{FPF}} \mathbf{W}_x \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{BF}} \mathbf{d}_{\text{GCRS}}, \quad (6)$$

$$\text{где } \mathbf{W}_x = [\boldsymbol{\omega} \times] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} - \text{матрица угло-}$$

вой скорости спутника в BF.

Уравнение (6) показывает, что суммарная СДИ складывается из поступательного и углового движений ОЗА и объекта съемки.

Перейдем к отысканию функциональных зависимостей для УДИ.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСКОРЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Для определения УДИ продифференцируем уравнение (4) второй раз:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{d}{dt} \left(f(V_x Z - X V_z) Z^{-2} \right) = \\ &= f \left[(A_x Z - X A_z) Z^{-2} - 2 V_z (V_x Z - X V_z) Z^{-3} \right]; \\ \ddot{y} &= \frac{d}{dt} \left(f(V_y Z - Y V_z) Z^{-2} \right) = \\ &= f \left[(A_y Z - Y A_z) Z^{-2} - 2 V_z (V_y Z - Y V_z) Z^{-3} \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Для определения вектора ускорения $\mathbf{a}_{\text{FPF}} = \{O_{\text{FPF}}, A_x, A_y, A_z\}$ в FPF продифференцируем выражение (5) второй раз:

$$\mathbf{a}_{\text{FPF}} = \frac{d}{dt} \left[\frac{d}{dt} \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{FPF}} \mathbf{d}_{\text{GCRS}} + \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{FPF}} \frac{d}{dt} \mathbf{d}_{\text{GCRS}} \right] = \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{FPF}} \mathbf{d}_{\text{GCRS}} + 2 \frac{d}{dt} \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{FPF}} \frac{d}{dt} \mathbf{d}_{\text{GCRS}} + \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{FPF}} \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{d}_{\text{GCRS}}. \quad (8)$$

Перепишем уравнение (8) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{\text{FPF}} &= -\frac{d}{dt} \left[\mathbf{M}_{\text{BF}}^{\text{FPF}} \mathbf{W}_x \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{BF}} \right] \mathbf{d}_{\text{GCRS}} - \\ &- 2 \mathbf{M}_{\text{BF}}^{\text{FPF}} \mathbf{W}_x \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{BF}} \frac{d}{dt} \mathbf{d}_{\text{GCRS}} + \\ &+ \mathbf{M}_{\text{BF}}^{\text{FPF}} \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{BF}} \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{d}_{\text{GCRS}}; \\ \mathbf{a}_{\text{FPF}} &= - \left\{ \frac{d}{dt} \mathbf{M}_{\text{BF}}^{\text{FPF}} \mathbf{W}_x \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{BF}} + \right. \\ &+ \mathbf{M}_{\text{BF}}^{\text{FPF}} \frac{d}{dt} \mathbf{W}_x \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{BF}} + \\ &+ \mathbf{M}_{\text{BF}}^{\text{FPF}} \mathbf{W}_x \frac{d}{dt} \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{BF}} \left. \right\} \mathbf{d}_{\text{GCRS}} - \\ &- 2 \mathbf{M}_{\text{BF}}^{\text{FPF}} \mathbf{W}_x \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{BF}} \frac{d}{dt} \mathbf{d}_{\text{GCRS}} + \\ &+ \mathbf{M}_{\text{BF}}^{\text{FPF}} \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{BF}} \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{d}_{\text{GCRS}}; \\ \mathbf{a}_{\text{FPF}} &= \mathbf{M}_{\text{BF}}^{\text{FPF}} \left[-\mathbf{E}_x \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{BF}} \mathbf{d}_{\text{GCRS}} - \right. \\ &- \mathbf{W}_x \mathbf{W}_x \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{BF}} \mathbf{d}_{\text{GCRS}} - \\ &- 2 \mathbf{W}_x \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{BF}} \frac{d}{dt} \mathbf{d}_{\text{GCRS}} + \\ &+ \mathbf{M}_{\text{GCRS}}^{\text{BF}} \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{d}_{\text{GCRS}} \left. \right], \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{где } \mathbf{E}_x = [\mathbf{e} \times] = \begin{bmatrix} 0 & -e_z & e_y \\ e_z & 0 & -e_x \\ -e_y & e_x & 0 \end{bmatrix} - \text{матрица углового}$$

ускорения спутника в BF.

В полученном уравнении первое слагаемое называют ускорением Эйлера, второе слагаемое – центробежным ускорением, третье слагаемое – ускорением Кориолиса. Далее определим вектор дальности $\mathbf{d}_{\text{GCRS}}$ и его производные.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ТОЧКИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Уравнения движения точки на земной поверхности записываются как:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{\text{GCRS}} &= \mathbf{M}_{\text{ITRS}}^{\text{GCRS}} \mathbf{x}_{\text{ITRS}}; \\ \dot{\mathbf{x}}_{\text{GCRS}} &= \mathbf{M}_{\text{ITRS}}^{\text{GCRS}} \dot{\mathbf{x}}_{\text{ITRS}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{GCRS}} \times \mathbf{x}_{\text{GCRS}}; \\ \ddot{\mathbf{x}}_{\text{GCRS}} &= \mathbf{M}_{\text{ITRS}}^{\text{GCRS}} \ddot{\mathbf{x}}_{\text{ITRS}} - \boldsymbol{\omega}_{\text{GCRS}} \times \\ &\quad \times (\boldsymbol{\omega}_{\text{GCRS}} \times \mathbf{x}_{\text{GCRS}}) + 2\boldsymbol{\omega}_{\text{GCRS}} \times \\ &\quad \times \dot{\mathbf{x}}_{\text{GCRS}} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_{\text{GCRS}} \times \mathbf{x}_{\text{GCRS}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\mathbf{x}_{\text{ITRS}}$, $\dot{\mathbf{x}}_{\text{ITRS}}$, $\ddot{\mathbf{x}}_{\text{ITRS}}$ – положение, скорость и ускорение точки на земной поверхности (в ITRS); $\mathbf{M}_{\text{ITRS}}^{\text{GCRS}}$ – матрица вращения между системами координат ITRS и GCRS; $\boldsymbol{\omega}_{\text{GCRS}}$ – вектор угловой скорости вращения Земли в GCRS.

Вектором углового ускорения вращения Земли можно пренебречь ($\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\text{GCRS}} \approx 0$).

Тогда векторы дальности, относительной скорости и относительного ускорения можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_{\text{GCRS}} &= \mathbf{x}_{\text{GCRS}} - \mathbf{x}_{\text{sat}} = \mathbf{M}_{\text{ITRS}}^{\text{GCRS}} \mathbf{x}_{\text{ITRS}} - \mathbf{x}_{\text{sat}}; \\ \dot{\mathbf{d}}_{\text{GCRS}} &= \dot{\mathbf{x}}_{\text{GCRS}} - \dot{\mathbf{x}}_{\text{sat}} = \mathbf{M}_{\text{ITRS}}^{\text{GCRS}} \dot{\mathbf{x}}_{\text{ITRS}} + \\ &\quad + \boldsymbol{\omega}_{\text{GCRS}} \mathbf{x}_{\text{GCRS}} - \dot{\mathbf{x}}_{\text{sat}}; \\ \ddot{\mathbf{d}}_{\text{GCRS}} &= \ddot{\mathbf{x}}_{\text{GCRS}} - \ddot{\mathbf{x}}_{\text{sat}} = \\ &= \mathbf{M}_{\text{ITRS}}^{\text{GCRS}} \ddot{\mathbf{x}}_{\text{ITRS}} - \boldsymbol{\omega}_{\text{GCRS}} \times (\boldsymbol{\omega}_{\text{GCRS}} \times \mathbf{x}_{\text{GCRS}}) + \\ &\quad + 2\boldsymbol{\omega}_{\text{GCRS}} \times \dot{\mathbf{x}}_{\text{GCRS}} - \ddot{\mathbf{x}}_{\text{sat}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Векторное поле скоростей и ускорений по ФП получим методом подстановки полученных выражений (11) в (9) и (6), вычисляя векторы СДИ и УДИ в соответствии с уравнениями (4) и (7) в каждой точке ФП.

ВЕРИФИКАЦИЯ

Сравним результаты, полученные в представленной математической модели и полученные в работе [2] для одних и тех же исходных данных.

На основании вычислений по предложенной математической модели в точке с координатами (0, 0) получены следующие значения СДИ: 46.951 мм/с по оси x и 2.592 мм/с по оси y . В [2] были получены значения 46.921 мм/с по оси x и 2.591 мм/с по оси y . Таким образом относительная погрешность вычислений составляет не более 0.1%, что говорит о достоверности предложенной модели вычисления СДИ.

Таблица 1. Исходные данные для проведения моделирования

Наименование параметра	Размерность	Численное значение
Наклонение орбиты спутника	градусы	60.000
Эксцентриситет орбиты	–	0.01
Большая полуось орбиты	км	6678.000
Фокусное расстояние ОЭА, f	м	1.500
Размеры ФП	мм	120 × 80

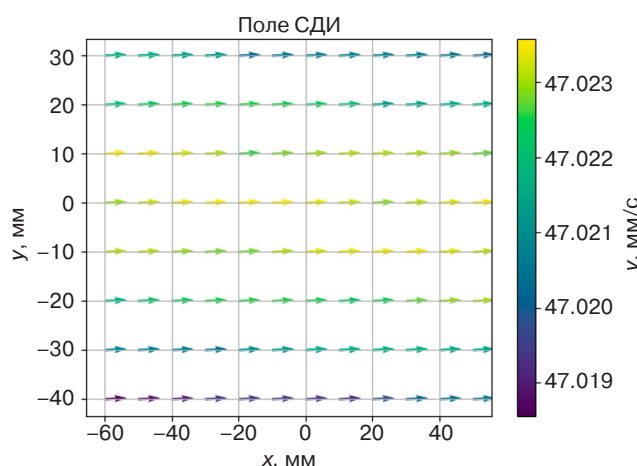


Рис. 2. Верификация модели

МОДЕЛИРОВАНИЕ

На основании математической модели разработана программа. Динамика спутника описывается дифференциальными уравнениями движения твердого тела [7, 12]. Вектор состояния спутника интегрируется с использованием метода Рунге – Кутты 4-го порядка [12] в шкале времени TAI [11]. В части линейного возмущения в движении спутника учтено только ускорение от воздействия гравитационного поля Земли с разложением 20×20 в соответствии с моделью EGM2008 [10], а в части углового возмущения – только управляющие крутящие моменты, определяемые с помощью PD-регулятора⁴ на основании рассогласования между фактическим угловым движением и опорным. При вычислении матрицы перехода из GCRS в ITRS и вычислении перехода между шкалами времени TAI и UTC используется библиотека программ, представленная SOFA [14].

Было рассмотрено два случая. В первом спутник находится в орбитальной ориентации (оси BF были сонаправлены осям LVLH), а во втором – параметры вращения спутника соответствуют опорному

⁴ PD-регулятор – пропорционально дифференцирующий регулятор. / PD-controller – proportional derivative controller.

угловому движению, при котором обеспечивается компенсация СДИ [7].

Моделирование проводилось для трех наборов исходных данных, представленных в табл. 2–4.

Таблица 2. Исходные данные для проведения моделирования

Наименование параметра	Размерность	Численное значение
Время начала моделирования	UTC	2020-01-01 00:00:00.000000
Время окончания моделирования	UTC	2020-01-01 00:30:00.000000
Наклонение орбиты спутника	градусы	97.000
Эксцентриситет орбиты	–	0.001
Большая полуось орбиты	км	6900.000
Фокусное расстояние ОЭА, f	м	2.000
Размеры ФП	мм	160 × 20
Опорная СДИ в центре ФП	мм/с	20.000
Опорная СДИ в правом крае ФП	мм/с	20.000

Результаты моделирования полей без компенсации представлены на рис. 3 и 4.

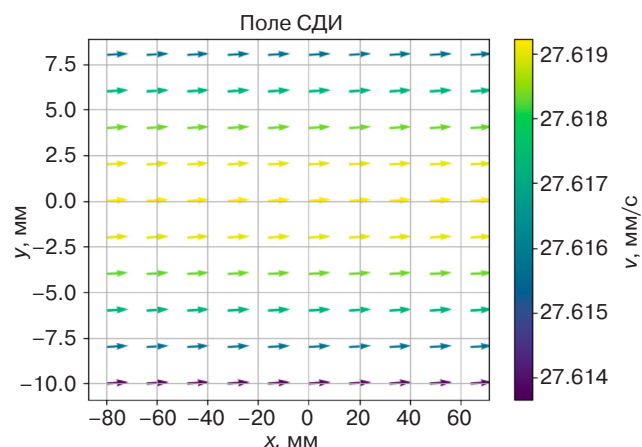


Рис. 3. Поле векторов СДИ без компенсации

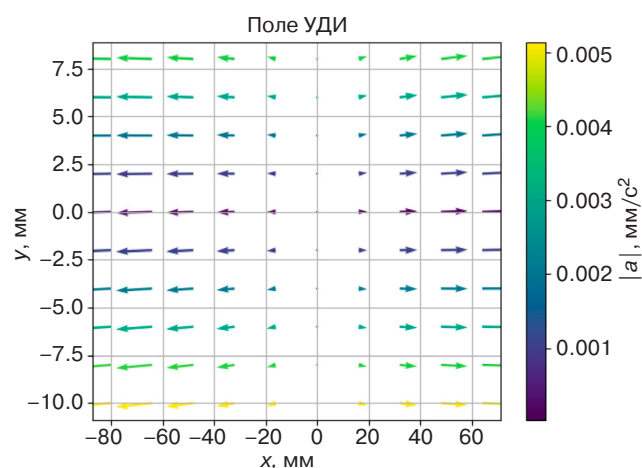


Рис. 4. Поле векторов УДИ без компенсации

Результаты моделирования остаточных полей СДИ и УДИ с компенсацией (опорная СДИ по $x = 20$ мм/с, по $y = 0$ мм/с) представлены на рис. 5 и 6.

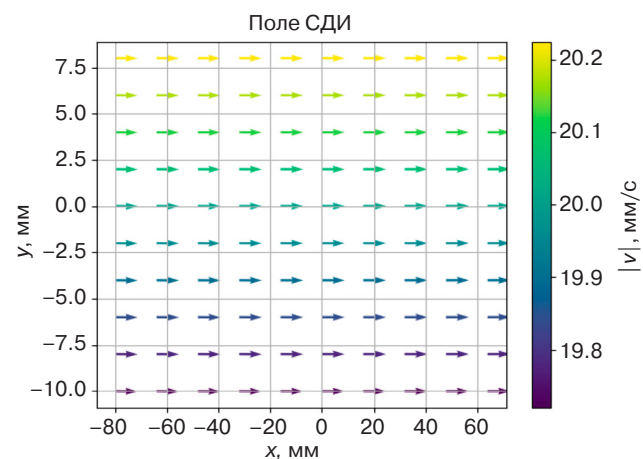


Рис. 5. Поле векторов СДИ с компенсацией

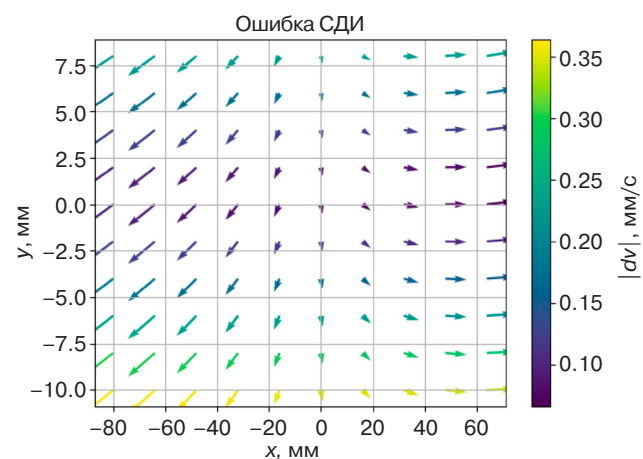


Рис. 6. Разница между опорным и фактическим полями СДИ после компенсации

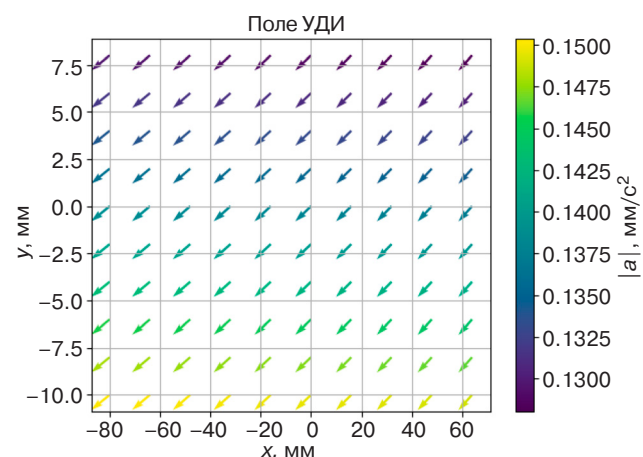


Рис. 7. Поле векторов УДИ с компенсацией

На рис. 6 можно увидеть остаточное поперечное поле СДИ (по оси y). Это можно объяснить тем, что при расчете опорной угловой скорости по алгоритму, описанному в [7], за опорные берутся две точки: в центре ФП и с правого края ФП (в рассматриваемом случае соответствует координатам $[0, 10]$). Именно в этих точках фактическая СДИ равна опорной СДИ.

Таким образом, моделирование показывает, что остаточное поле существует даже при использовании алгоритма компенсации, что позволяет выбирать такие координаты ФП, в которых требуется обеспечить опорный вектор СДИ.

На рис. 8 и 9 представлены графики углов ориентации спутника и угловых скоростей спутника в режиме компенсации СДИ.

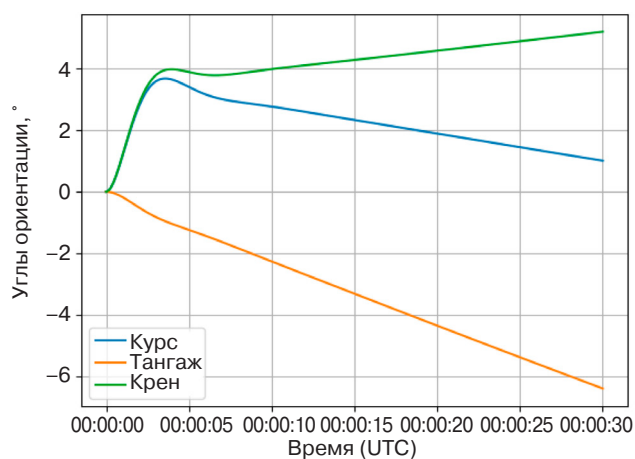


Рис. 8. Углы ориентации спутника в LVLH

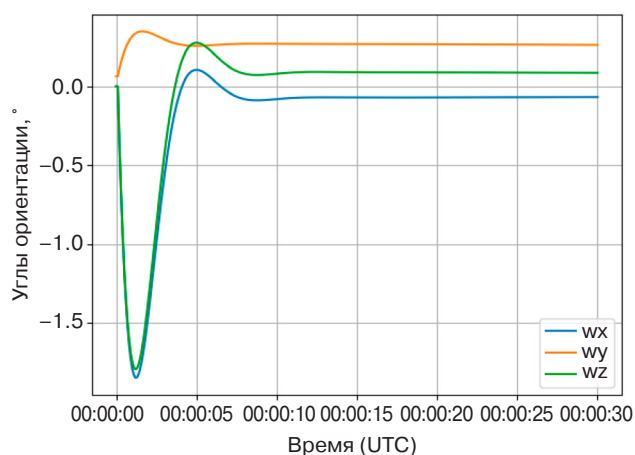


Рис. 9. Угловые скорости спутника относительно BF

Результаты моделирования поля векторов СДИ и поля векторов УДИ без компенсации представлены на рис. 10 и 11.

Результаты моделирования поля векторов СДИ с компенсацией и разница между опорным и фактическим полями СДИ после компенсации представлены на рис. 12, 13.

Таблица 3. Исходные данные для проведения моделирования

Наименование параметра	Размерность	Численное значение
Время начала моделирования	UTC	2020-01-01 00:00:00.000000
Время окончания моделирования	UTC	2020-01-01 00:30:00.000000
Наклонение орбиты спутника	градусы	97.000
Эксцентриситет орбиты	—	0.001
Большая полуось орбиты	км	7000.000
Фокусное расстояние ОЭА, f	м	2.000
Размеры ФП	мм	160×20

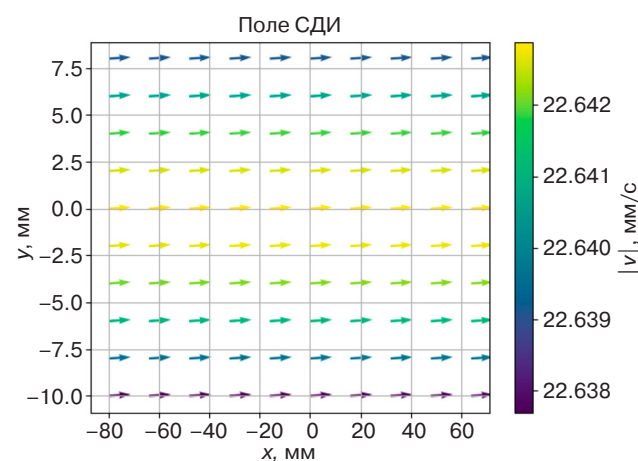


Рис. 10. Поле векторов СДИ без компенсации

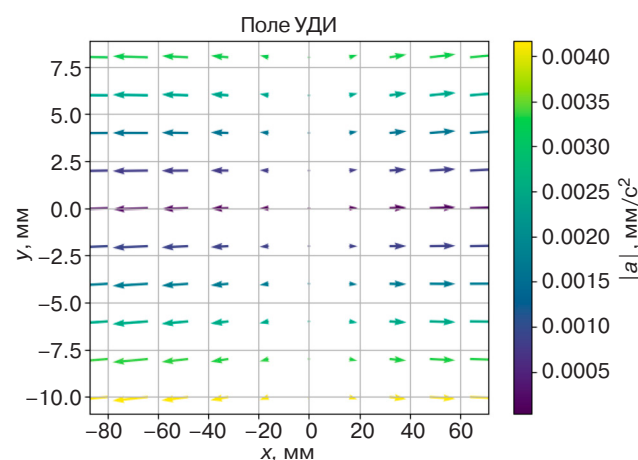


Рис. 11. Поле векторов УДИ без компенсации

Таблица 4. Исходные данные для проведения моделирования

Наименование параметра	Размерность	Численное значение
Время начала моделирования	UTC	2020-01-01 00:00:00.000000
Время окончания моделирования	UTC	2020-01-01 00:30:00.000000
Наклонение орбиты спутника	градусы	97.000
Эксцентриситет орбиты	—	0.001
Большая полуось орбиты	км	7000.000
Фокусное расстояние ОЭА, f	м	2.000
Размеры ФП	мм	160 × 20
Опорная СДИ в центре ФП	мм/с	30.000
Опорная СДИ в правом крае ФП	мм/с	30.000

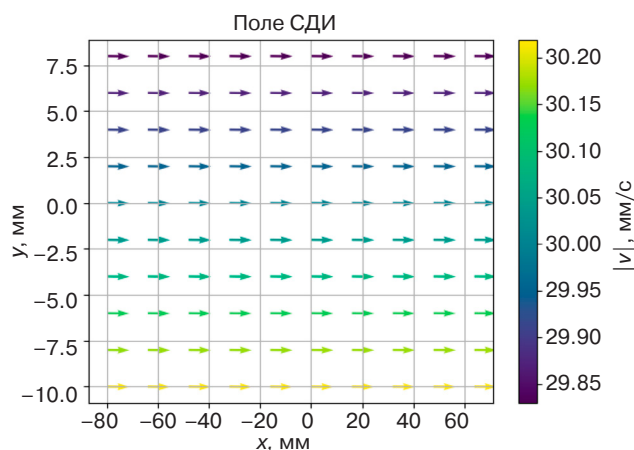


Рис. 12. Поле векторов СДИ с компенсацией

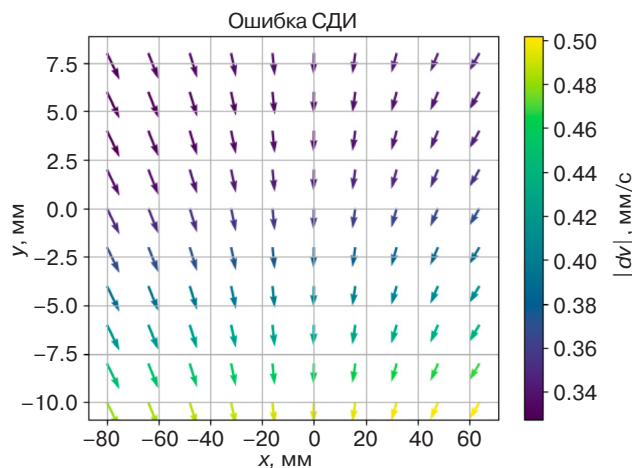


Рис. 13. Разница между опорным и фактическим полями СДИ после компенсации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье получены математические зависимости, позволяющие вычислять поля векторов скоростей и ускорений движения изображения на фотоприемниках оптико-электронной аппаратуры, установленной на спутнике.

С использованием полученных зависимостей можно на наземном этапе оценить накопленное смещение изображения за время экспозиции, а во время эксплуатации спутника не допустить съемок с неподходящими скоростями движения изображения, т.е. предотвратить направленные «смазы» изображения.

Полученные зависимости могут найти применение при вычислении матрицы сдвига изображения для получения сверхразрешения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Геча В.Я., Жиленев М.Ю., Горчаков С.Ю., Новоселов С.А. Формулы расчета кинематических параметров орбитальной съемки планеты бортовой оптико-электронной аппаратурой космического аппарата. *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*. 2019;173(6): 23–32. URL: <https://jurnal.vniiem.ru/text/173/23-32.pdf>
- Геча В.Я., Жиленев М.Ю., Федоров В.Б., Хрычев Д.А., Худак Ю.И., Шатина А.В. Скорость движения изображения при оптико-электронной съемке поверхности планеты. *Russian Technological Journal*. 2018;6(4): 65–77. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-4-65-77>
- Жиленев М.Ю., Винтаев В.Н. Формула расчета движения изображения при орбитальной съемке планет оптико-электронной аппаратурой. *Телекоммуникации*. 2011;7:2–7.

REFERENCES

- Gecha V.Ya., Zhilenev M.Yu., Gorchakov S.Yu., Novoselov S.A. Formulas for calculating the kinematic parameters of the planet's orbital survey by the spacecraft's on-board optic imager when taking into account the required the velocity of the image motion on its photodetector. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEEM = Electromechanical Matters. VNIIEEM Studies*. 2019;173(6):23–32 (in Russ.). Available from URL: <https://jurnal.vniiem.ru/text/173/23-32.pdf>
- Gecha V.Y., Zhilenev M.Yu., Fyodorov V.B., Khrychev D.A., Khudak Yu.I., Shatina A.V. The image speed during the optical-electronic surfacing the planet. *Russ. Technol. J.* 2018;6(4):65–77 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-4-65-77>

4. Brown E.B. V/H Image Motion in Aerial Cameras. *Photogramm. Eng.* 1965;31(2):308–323.
5. Геча В.Я., Жиленив М.Ю., Федоров В.Б., Хрычев Д.А., Худак Ю.И., Шатина А.В. Поле скоростей движения точек изображения при орбитальной съемке поверхности планеты. *Russian Technological Journal.* 2020;8(1):97–109. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-97-109>
6. Kawachi D.A. Image Motion and Its Compensation for the Oblique Frame Camera. *Photogramm. Eng.* 1965;31(1):154–165.
7. Горчаков С.Ю. Синтез программных угловых движений космического аппарата дистанционного зондирования Земли с высоким пространственным разрешением. *Russian Technological Journal.* 2021;9(3):78–87. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-78-87>
8. Бутырин С.А. Кинематический синтез программного углового движения космического аппарата при оптико-электронной съемке Земли. *Известия Самарского научного центра РАН.* 2007;9(3):664–670. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kinematicheskii-sintez-programmnogo-uglovogo-dvizheniya-kosmicheskogo-apparata-pri-optiko-elektronnoy-semke-zemli/viewer>
9. Маштаков Я.В., Ткачев С.С. Построение углового движения спутника ДЗЗ при отслеживании маршрутов на поверхности Земли. *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша.* 2014;20. 31 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-20>
10. Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008. *Geophysic. Res. Abstracts.* 10, EGU2008-A-01891, 2008, SRef ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-01891, EGU General Assembly.
11. Petit G., Luzum B. *IERS Conventions.* Frankfurt am Main, Germany: International Earth Rotation and Reference Systems Service; 2010. 179 p.
12. Canuto E., Massotti L., Montenegro C.P., Novara C., Carlucci D. *Spacecraft Dynamics and Control: The Embedded Model Control Approach.* Elsevier; 2018. 779 p. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-00420-5>
13. Bangert J., Bell S., Capitaine N. *SOFA Tools for Earth Attitude.* International Astronomical Union; 2021. 157 p.
14. Bangert J., Bell S., Capitaine N. *SOFA Time Scale and Calendar Tools.* International Astronomical Union; 2021. 67 p.
15. Урмаев М. *Космическая фотограмметрия.* М.: Недра; 1989. 278 с. ISBN 5-247-01273-9
3. Zhilenev M.Yu., Vintaev V.N. The formula for calculating the image motion during planet optoelectronic acquisition. *Telekommunikatsii = Telecommunications.* 2011;7:2–7 (in Russ.).
4. Brown E.B. V/H Image Motion in Aerial Cameras. *Photogramm. Eng.* 1965;31(2):308–323.
5. Gecha V.Y., Zhilenev M.Yu., Fedorov V.B., Khrychev D.A., Khudak Yu.I., Shatina A.V. Velocity field of image points in satellite imagery of planet's surface. *Russ. Technol. J.* 2020;8(1):97–109 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-97-109>
6. Kawachi D.A. Image Motion and Its Compensation for the Oblique Frame Camera. *Photogramm. Eng.* 1965;31(1):154–165.
7. Gorchakov S.Yu. Synthesis of program angular motions of the Earth remote sensing spacecraft with high spatial resolution. *Russ. Technol. J.* 2021;9(3):78–87 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-78-87>
8. Butyrin S.A. Kinematic synthesis of the spacecraft programmed attitude motion at the earth optic-electronic survey. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* 2007;9(3):664–670 (in Russ.). Available from URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kinematicheskii-sintez-programmnogo-uglovogo-dvizheniya-kosmicheskogo-apparata-pri-optiko-elektronnoy-semke-zemli/viewer>
9. Mashtakov Ya., Tkachev S. Synthesis and constructing the angular motion of the remote sensing satellite for tracking the trajectory on the Earth surface. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha = Keldysh Institute Preprints.* 2014;20. 31 p. (in Russ.). Available from URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-20>
10. Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008. *Geophysic. Res. Abstracts.* 10, EGU2008-A-01891, 2008, SRef ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-01891, EGU General Assembly.
11. Petit G., Luzum B. *IERS Conventions.* Frankfurt am Main, Germany: International Earth Rotation and Reference Systems Service; 2010. 179 p.
12. Canuto E., Massotti L., Montenegro C.P., Novara C., Carlucci D. *Spacecraft Dynamics and Control: The Embedded Model Control Approach.* Elsevier Ltd.; 2018. 779 p. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-00420-5>
13. Bangert J., Bell S., Capitaine N. *SOFA Tools for Earth Attitude.* International Astronomical Union; 2021. 157 p.
14. Bangert J., Bell S., Capitaine N. *SOFA Time Scale and Calendar Tools.* International Astronomical Union; 2021. 67 p.
15. Uрмаев М. *Kosmicheskaya fotogrammetriya (Space photogrammetry).* Moscow: Nedra; 1989. 278 p. (in Russ.). ISBN 5-247-01273-9

Об авторе

Горчаков Сергей Юрьевич, аспирант, кафедра высшей математики Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sygorchakov@yandex.ru. SPIN-код РИНЦ 2275-8579, <http://orcid.org/0000-0003-2266-5284>

About the author

Sergei Yu. Gorchakov, Postgraduate Student, Higher Mathematics Department, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sygorchakov@yandex.ru. RSCI SPIN-code 2275-8579, <http://orcid.org/0000-0003-2266-5284>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 004.023, 519.677
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-57-67>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Исследование влияния степени овражности целевой функции на погрешность определения координат ее минимума

А.В. Смирнов [®]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Целью работы было исследование зависимостей, связывающих характеристики оврагов, т.е. участков рельефа минимизируемой функции, на которых ее изменение по одному из направлений значительно медленнее, чем по другим направлениям, с погрешностью определения координат ее минимума.

Методы. В экспериментах использовалась специально разработанная тестовая функция с изменяемыми в широких пределах параметрами овражности. В сериях опытов случайно задавались положение и параметры оврага и координаты стартовой точки поиска. Размерность и степень овражности оценивались по собственным числам аппроксимированного гессиана функции в точке окончания поиска минимума. Погрешность определялась как евклидово расстояние между заданным положением минимума функции и конечной точкой поиска. Для статистической обработки результатов применены линейный регрессионный анализ и аппроксимация с помощью модели искусственной нейронной сети (ИНС).

Результаты. Установлено наличие линейной зависимости между логарифмами степени овражности и погрешности определения координат минимума функции. Коэффициент детерминации $R^2 \sim 0.88$. Дополнительный учет евклидовой нормы градиента функции в точке окончания поиска позволил повысить коэффициент детерминации до $R^2 \sim 0.95$, а при использовании модели ИНС – до $R^2 \sim 0.97$.

Выводы. Найденные зависимости можно использовать для оценки ожидаемой погрешности определения координат экстремумов оптимизируемых функций. В дальнейшем необходимо расширить методику на функции с размерностью оврагов более единицы и на другие типы сложных для алгоритмов оптимизации участков рельефа.

Ключевые слова: рельеф целевой функции, овражность рельефа, степень овражности, размерность овражности, собственные значения гессиана, линейная регрессия, аппроксимация, искусственная нейронная сеть

• Поступила: 10.04.2023 • Доработана: 19.05.2023 • Принята к опубликованию: 07.09.2023

Для цитирования: Смирнов А.В. Исследование влияния степени овражности целевой функции на погрешность определения координат ее минимума. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):57–67. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-57-67>

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Investigation of influence of objective function valley ratio on the determination error of its minimum coordinates

Alexander V. Smirnov [®]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: av_smirnov@mirea.ru

Abstract

Objectives. A valley is a region of an objective function landscape in which the function varies along one direction more slowly than along other directions. In order to determine the error of the objective function minimum location in such regions, it is necessary to analyze relations of valley parameters.

Methods. A special test function was used in numerical experiments to model valleys with variables across wide ranges of parameters. The position and other valley parameters were defined randomly. Valley dimensionality and ratio were estimated from eigenvalues of the approximated Hessian of objective function in the termination point of minimum search. The error was defined as the Euclidian distance between the known minimum position and the minimum search termination point. Linear regression analysis and approximation with an artificial neural network model were used for statistical processing of experimental data.

Results. A linear relation of logarithm of valley ratio to logarithm of minimum position error was obtained. Here, the determination coefficient R^2 was ~ 0.88 . By additionally taking into account the Euclidian norm of the objective function gradient in the termination point, R^2 can be augmented to ~ 0.95 . However, by using the artificial neural network model, an approximation $R^2 \sim 0.97$ was achieved.

Conclusions. The obtained relations may be used for estimating the expected error of extremum coordinates in optimization problems. The described method can be extended to functions having a valley dimensionality of more than one and to other types of hard-to-optimize algorithms regions of objective function landscapes.

Keywords: objective function landscape, valley landscape, valley ratio, valley dimensionality, Hessian eigenvalues, linear regression, approximation, artificial neural network

• Submitted: 10.04.2023 • Revised: 19.05.2023 • Accepted: 07.09.2023

For citation: Smirnov A.V. Investigation of influence of objective function valley ratio on the determination error of its minimum coordinates. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):57–67. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-57-67>

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

Задача поиска оптимального решения $\mathbf{x}_{\text{opt}}$ формулируется как

$$\mathbf{x}_{\text{opt}} = \arg \min_{\mathbf{x} \in X} f(\mathbf{x}), \quad (1)$$

где X – область поиска, $f(\mathbf{x})$ – целевая функция (ЦФ). Известны многочисленные методы решения задачи (1), как имеющие достаточно строгое математическое обоснование и применимые в случаях, когда ЦФ удовлетворяет определенным условиям (выпуклость, гладкость и т.д.) [1, 2], так и эвристические,

не накладывающие жестких требований на свойства ЦФ, но и не гарантирующие нахождение оптимального решения [3, 4].

Возможность и точность решения задачи (1) определяются свойствами и ЦФ, и алгоритма поиска. В связи с этим значительное внимание исследователей привлекает анализ рельефа ЦФ, где под рельефом понимается множество пар $\{\mathbf{x} \in X, f(\mathbf{x})\}$. При этом аналитическое выражение функции $f(\mathbf{x})$ отсутствует, и ее значения приходится находить путем моделирования оптимизируемой системы (задачи black box optimization). Данное направление получило название exploratory landscape analysis (ELA).

В [5] и других работах той же группы авторов дана классификация свойств рельефов ЦФ высокого уровня, определяемых качественно методом экспертной оценки, и свойств низкого уровня, оцениваемых количественно путем обработки результатов расчетов ЦФ в пробных точках и результатов поиска экстремумов ЦФ из стартовых точек. К свойствам высокого уровня относятся мульти-модальность, т.е. наличие многих локальных экстремумов, регулярность и равномерность свойств рельефа ЦФ в области поиска, наличие плато и др. Среди свойств низкого уровня – статистика значений ЦФ, показатели кривизны и выпуклости, показатели корреляции различий значений ЦФ и расстояний между пробными точками и многие другие. В [6] рассматриваются более 300 свойств низкого уровня и приведен список публикаций по данной тематике. Для поиска статистических зависимостей между свойствами низкого и высокого уровней, а также между свойствами рельефа и характеристиками работы различных алгоритмов оптимизации на этом рельефе применяются технологии машинного обучения [5, 7].

Однако в указанных выше и других известных нам работах практически не рассматривались такие объекты рельефа ЦФ, как овраги (valley), т.е. области, в которых ЦФ по одному или нескольким направлениям изменяется существенно медленнее, чем по другим направлениям [8], и стены, представляющие собой резкие изменения ЦФ по какому-либо направлению [9]. Между тем, при наличии таких объектов поиск может заканчиваться не в экстремуме, а в какой-либо другой точке на дне оврага или у подножья стены. В таком случае алгоритмы оптимизации будут находить неправильные решения. Проблемы, связанные с обнаружением указанных объектов в рельефе ЦФ и оценкой их количественных характеристик, исследованы мало.

Теоретические аспекты возникновения оврагов в рельефе и методов поиска решений при их наличии рассмотрены в [8]. Из нескольких определений овражности, предложенных в этой монографии, далее будем использовать наиболее удобное в приложениях, которое приведем с некоторым упрощением, опустив дополнительные условия.

Пусть D – некоторая область n -мерного пространства R^n ; $J(x) \in C^2(D)$ – функционал, имеющий в D непрерывные вторые производные; $H(x)$ – матрица вторых производных (гессиан) функционала $J(x)$ в точке x ; $\lambda_i[H(x)]$, $i = 1, n$ – собственные числа гессиана $H(x)$ в точке x , упорядоченные по убыванию.

Функционал называется овражным, т.е. содержащим овраг, если найдутся такое число $\sigma \gg 1$ и множество $Q \subset D$, что

$$\forall x \in Q \quad \lambda_1[H(x)] \geq \dots \geq \lambda_{n-r}[H(x)] \geq \sigma \lambda_{n-r+1}[H(x)] \geq \dots \geq \sigma \lambda_n[H(x)]. \quad (2)$$

Это означает, что наибольшие $(n - r)$ собственных чисел гессиана существенно больше, чем остальные r собственных чисел во всех точках x , принадлежащих области оврага Q . При этом число r называется размерностью оврага, а число σ – степенью овражности. Степень овражности показывает, насколько в данном овраге скорость изменения ЦФ вдоль его дна меньше, чем по направлениям, ортогональным дну. Эти показатели обобщенно можно назвать характеристиками или показателями овражности рельефа.

Результатом наличия оврагов в рельефе ЦФ, как уже отмечено выше, является погрешность определения координат экстремумов ЦФ. Именно эта погрешность может служить объективной характеристикой овражности. Но непосредственно оценивать погрешность при поиске минимума ЦФ на практике невозможно, т.к. истинное положение минимума неизвестно. В то же время степень овражности может быть оценена на основе определения (2). В связи с этим представляет интерес задача исследования зависимости, связывающей указанную погрешность со степенью овражности. Такая задача в [8] и других известных нам работах не рассматривалась, как и практическая реализация оценки степени овражности при выполнении поиска минимума ЦФ.

Отметим также работу [10], в которой вводится определение оврага как одномерного множества с использованием понятия топологического гомеоморфизма. Там же представлен метод определения положения и направления оврага, основанный на выделении из множества пробных точек подмножества точек с наименьшими значениями ЦФ и применении к этому подмножеству метода анализа главных компонент. Количественные характеристики овражности в данной работе не рассматривались. В [11] исследуются свойства рельефа ЦФ известной комбинаторной задачи «странствующего коммивояжера» и показано, что этот рельеф содержит группы близко расположенных впадин, также названные valley, но эти результаты неприменимы к задачам оптимизации функций непрерывных переменных.

Цель данной работы – исследовать зависимость погрешности определения координат искомого минимума ЦФ от характеристик овражности в окрестностях точек окончания поиска.

Для достижения поставленной цели требуется выполнить цикл экспериментов по поиску из различных стартовых точек минимума ЦФ с варьируемыми параметрами оврага, включая его положение,

ориентацию относительно осей координат, крутизну и кривизну склонов и т.д. При этом в конце каждого поиска необходимо определять собственные числа гессиана ЦФ, а по ним размерность оврага и степень овражности в соответствии с определением (2), а также вычислять погрешность, равную расстоянию конечной точки поиска до истинного положения минимума ЦФ. Затем следует провести анализ статистических зависимостей, связывающих характеристики овражности и погрешность определения координат минимума ЦФ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В первую очередь надо выбрать метод поиска минимума ЦФ. Погрешность координат минимума при наличии оврагов может существенно различаться для разных алгоритмов оптимизации. Выбрав алгоритм и выполнив экспериментальные исследования, можно будет построить шкалу оценки овражности, с которой затем будут сравниваться результаты других алгоритмов.

В данной работе использовался квазиньютоновский алгоритм локального поиска, реализуемый в программной среде *MATLAB* функцией *fmincon*(..). Алгоритм такого типа рекомендован в [6] как образцовый для поиска локальных экстремумов тестовых функций при оценке свойств рельефа ЦФ. Кроме того, в квазиньютоновских методах аппроксимация гессиана является неотъемлемой частью алгоритма на каждой итерации и, следовательно, автоматически получается в конечной точке поиска [1].

В список выходных переменных функции *fmincon*(..) входят вектор координат точки окончания поиска $\mathbf{x}_{\text{fin}}$, значение ЦФ f_{fin} в точке $\mathbf{x}_{\text{fin}}$, индикатор причины окончания поиска *ExitFlag*, вектор градиента ЦФ и аппроксимация гессиана в точке $\mathbf{x}_{\text{fin}}$ в виде матрицы действительных чисел. Во входных переменных задавались границы области поиска

$$-5 \leq x_i \leq 5, \quad i = \overline{1, ND}, \quad (3)$$

вариант алгоритма поиска SQP (sequential quadratic programming), максимальное число итераций в каждом поиске равно 1000, остальные настройки – по умолчанию.

Далее рассмотрим использованную в экспериментах ЦФ. Для испытаний и сравнения алгоритмов поиска экстремумов применяются наборы тестовых функций [12, 13]. Среди них есть обладающие свойством овражности, но нет функции, в которой параметры оврага можно было бы изменять в широких пределах. В связи с этим была разработана функция *TestValley*(..), текст которой на языке *MATLAB* приведен на рис. 1.

Здесь $\mathbf{x}$ – координаты точки, в которой рассчитывается значение функции, $\mathbf{x}_{\text{opt}}$ и f_{opt} – задаваемые координаты точки минимума и значение функции в ней, $\mathbf{R}$ – ортонормированная матрица, задающая поворот осей координат. Эти параметры позволяют получать различные положения и ориентации оврага в пространстве поиска. Параметр N задает размерность оврага. Параметр W определяет кривизну склонов оврага. При $W = 1$ ЦФ – квадратичная, т.е.

```

%%TestValley - моделирование овражности с изменяемыми параметрами
function f = TestValley(x, fopt, xopt, R, P, W, K, N)
%%P - тип масштабирования по разным координатам.
%%P=0 одинаковая скорость нарастания по всем x(i), i>N.
%%P>0 - при j>i нарастание по x(j) быстрее, чем по x(i).
%%W - тип зависимости от расстояния от дна оврага.
%%W=0.5 - линейная функция,
%%W<0.5 - вогнутая функция, W>0.5 - выпуклая функция.
%%K - общий коэффициент масштаба по направлениям от оси.
%%N - размерность оврага.
n=length(x);
z0=(x-xopt)*R;
L=eye(n);
for n1=1:n
    L(n1,n1)=10^(P*(n1-1)/2/(n-1));
end
z1=z0*L;
z3=z1.^2;
f=sum(z3(1:N),2)+K*(sum(z3(N+1:n),2))^W+fopt;
end

```

Рис. 1. Текст программы, реализующей функцию *TestValley*(..)

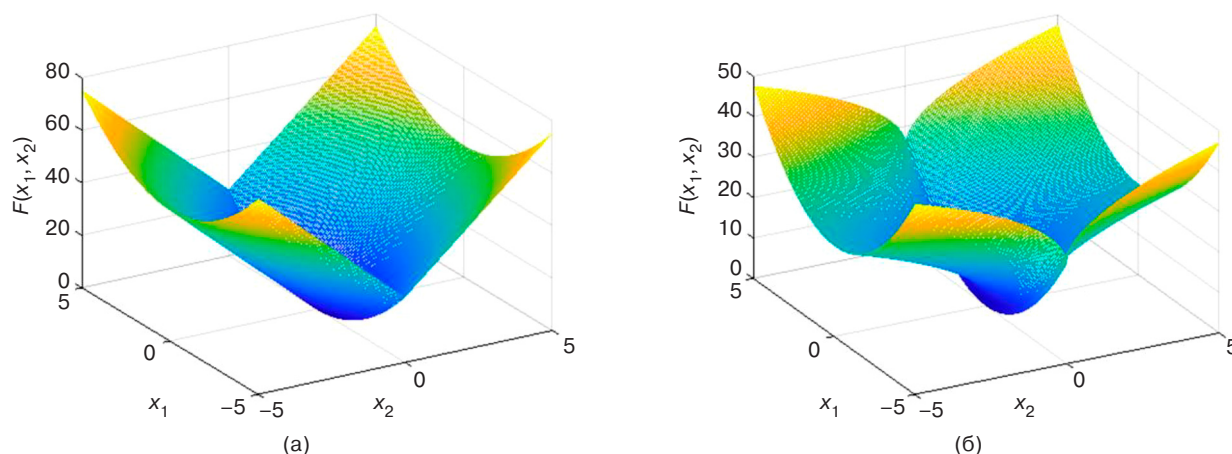


Рис. 2. Графики функции *TestValley*(..): (а) $W = 0.5$; (б) $W = 0.25$

выпуклая и гладкая. При $1 < W < 0.5$ ЦФ выпуклая, но не гладкая. При $W = 0.5$ ЦФ нарастает линейно. Наконец, при $W < 0.5$ ЦФ вогнутая. Параметр K задает единый масштаб скорости нарастания ЦФ по всем направлениям. Параметр P влияет на анизотропию ЦФ. При $P = 0$ ЦФ нарастает с одинаковой скоростью по всем направлениям, а при $P > 0$ скорость нарастания по разным направлениям разная, и эти различия тем больше, чем больше P .

Примеры графиков функции при размерности пространства поиска $ND = 2$, значениях параметров $P = 0$, $K = 10$, $N = 1$ и разных значениях параметра W приведены на рис. 2.

Координаты стартовых точек в количестве $NPnt$ в пределах границ области поиска (3) задавались с применением алгоритма формирования латинского гиперквадрата, реализуемого в *MATLAB* функцией *lhsdesign*(..). Значение функции f_{opt} в минимуме устанавливалось равным 0. В данной работе исследовались только одномерные овраги при $N = 1$. Значения остальных параметров задавались случайными числами с равномерными распределениями в следующих диапазонах

$$\begin{aligned} -3 \leq x_{opti} \leq 3, \quad i = \overline{1, ND}; \\ 0 \leq P \leq 1; \quad 0.25 \leq W \leq 1.25; \\ 0 \leq \lg K \leq 4. \end{aligned} \quad (4)$$

Матрица поворота $\mathbf{R}$ формировалась в виде квадратной матрицы $ND \times ND$ равномерно распределенных в интервале (0; 1) случайных чисел

```
[X1,GF1,ExitFlag,~,~,grad,hess]=fmincon(@FEval,Xin,[],[],[],[],[],Lb,Ub,[],MIOptions);
Ehess=eig(hess);
HessEV=sort(abs(Ehess));
S0hess=HessEV(2:end)./HessEV(1:end-1);
[SValley,NValley]=max(S0hess); %степень и размерность овражности
```

Рис. 3. Вызов функции поиска и оценка параметров овражности в точке его окончания

с последующей ортогонализацией с применением функции *MATLAB orth*(..). Задание перечисленных параметров возможно как отдельно для каждого старта, так и один раз для всей серии из $NPnt$ стартов.

Вызов функции поиска минимума и обработка возвращаемых ей результатов поясняются фрагментом программы на рис. 3. В переменных $\mathbf{X}_1$ и GF_1 возвращаются, соответственно, координаты точки окончания поиска $\mathbf{x}_{fin}$ и значение ЦФ f_{fin} в ней. Массивы **grad** и **hess** содержат, соответственно, вектор градиента и матрицу аппроксимированного гессиана. Указатель **@FEval** содержит ссылку для вызова функции *TestValley*(..), при выполнении которого задаются ее входные параметры, как это было описано выше.

Программа находит вектор собственных значений гессиана **Ehess** и упорядочивает их по возрастанию абсолютного значения в массиве **HessEV**. Затем рассчитываются отношения смежных значений, сохраняемые в массиве **S0hess**. Наконец определяется оценка степени овражности *SValley* как максимальное из значений этих отношений и размерность оврага *NValley* как номер максимального значения в массиве. Такое определение степени и размерности овражности соответствует приведенному выше определению (2) с тем принципиальным отличием, что упорядочивание собственных значений гессиана выполняется не по убыванию, а по возрастанию. Погрешность определения координат минимума $D\mathbf{X}_{opt}$ рассчитывается как евклидово расстояние между точками $\mathbf{x}_{opt}$ и $\mathbf{x}_{fin}$.

Анализ зависимостей между переменными осуществлялся двумя методами. Первый из них – линейный регрессионный анализ [14]. Для его реализации применялась функция *MATLAB fitlm(...)*, аппроксимирующая по исходным данным линейную модель. Второй метод – обучение модели искусственной нейронной сети (ИНС), аппроксимирующей искомую зависимость [15]. Для этого использовались функция *fitnet(...)*, создающая модель ИНС с заданной структурой, и функция *train(...)*, выполняющая обучение и тестирование модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сначала рассмотрим представленные на рис. 4 результаты предварительных экспериментов, дающие представление о влиянии степени овражности на погрешность нахождения точки минимума функции *TestValley(...)*. Размерность задачи $ND = 4$, число стартов $NPnt = 40$, положение минимума и поворот оврага заданы один раз для всей серии. Входные параметры функции показаны над диаграммами, отображающими перемещение от стартовой точки (красные маркеры) до конечной точки x_{fin} (синие маркеры). На одной диаграмме показаны изменения всех четырех координат, при этом кружками помечены координаты x_1 и x_2 , а треугольниками – x_3 и x_4 .

В случае слабой овражности (рис. 4а) поиск из всех стартовых точек приходит в окрестность точки минимума тестовой функции. Среднее значение погрешности DX_{opt} при этом равно 0.019. В случае же сильной овражности (рис. 4б) поиски, стартовавшие из разных точек, заканчиваются в разных точках, рассредоточенных вдоль дна оврага. При этом среднее значение DX_{opt} достигает 9.2.

Далее была выполнена серия экспериментов, имевших целью выявление зависимости между оценкой степени овражности S_{Valley} и погрешностью нахождения точки минимума тестовой функции DX_{opt} . Размерность пространства ND менялась в диапазоне от 2 до 12. Каждый эксперимент включал $12 \cdot 10^3$ стартов, в каждом из которых задавались случайные положение стартовой точки поиска, положение минимума x_{opt} и поворот R функции *TestValley(...)*, а также параметры овражности P, W, K в диапазонах, определенных неравенствами (4).

Результаты экспериментов для всех значений ND оказались сходными. В качестве примера на рис. 5 приведены гистограммы значений результатов эксперимента для $ND = 4$. В связи с широкими диапазонами значений S_{Valley} и DX_{opt} анализируются и отображаются на графиках их логарифмы. Из диаграммы рассеяния этих переменных, показанной на рис. 6, можно сделать вывод о наличии стохастической зависимости между ними.

Отметим, что значение $ExitFlag = 1$ соответствует окончанию поиска, когда модуль градиента в достигнутой точке не превышает заданного значения *OptimalityTolerance* (по умолчанию 10^{-6}), а значение $ExitFlag = 2$ – когда последнее перемещение при поиске не превышает заданного значения *StepTolerance* (по умолчанию – также 10^{-6}). Во втором случае модуль градиента ЦФ в точке окончания поиска может оказаться значительно больше *OptimalityTolerance*, т.к. на оси оврага нарушаются условия гладкости ЦФ, что было проиллюстрировано рис. 2.

При этом не оказалось ни одного случая, когда поиск закончился из-за превышения заданного числа итераций ($MaxIteration = 1000$) или из-за того,

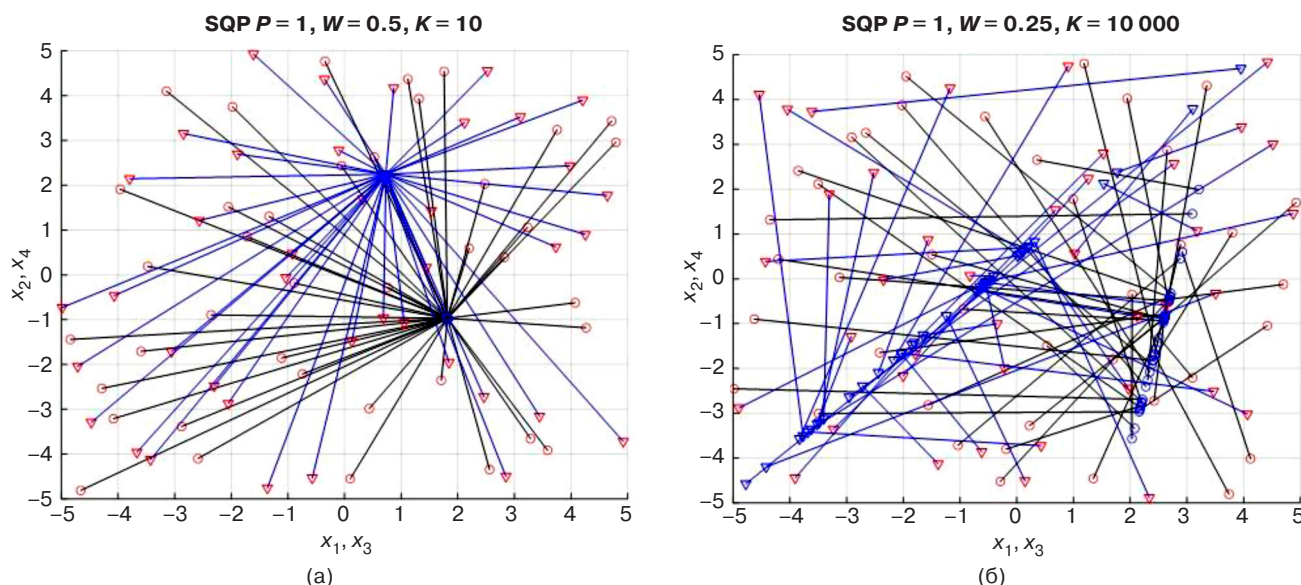


Рис. 4. Результаты поиска минимума *TestValley(...)* при слабой (а) и сильной (б) овражности

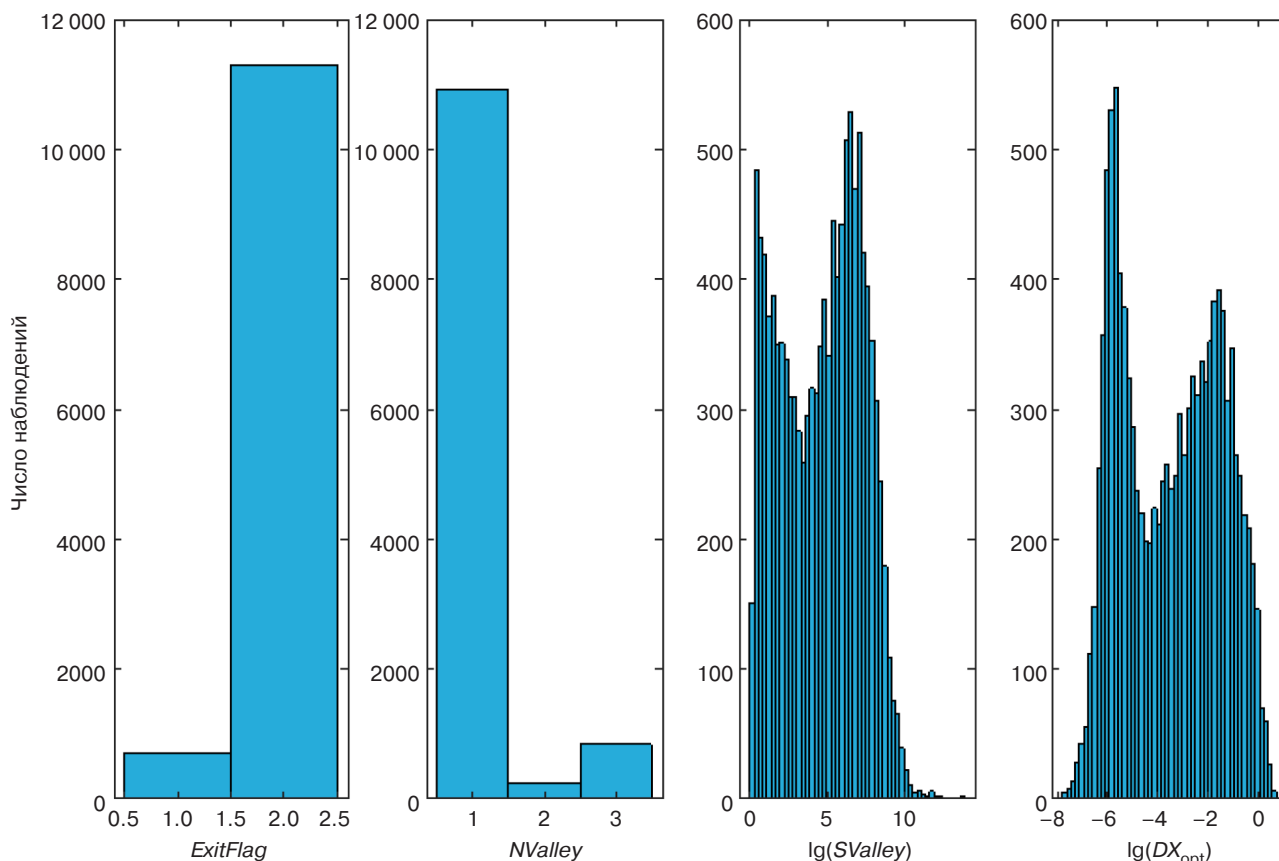


Рис. 5. Гистограммы результатов основного эксперимента. *ExitFlag* – индикатор причины окончания поиска; *NValley* – оценка размерности оврага; *SValley* – оценка степени овражности; DX_{opt} – оценка погрешности определения положения минимума ЦФ

что алгоритм не смог найти допустимую точку для дальнейшего движения. Таким образом, все старты поиска закончились в точках, которые алгоритм определил как локальный минимум. Аналогичные результаты зафиксированы для всех значений размерности пространства ND .

Далее, в большинстве стартов правильно определена размерность оврага в конечной точке поиска $NValley = 1$. При $ND = 4$ в 1092 точках размерность оврага была определена ошибочно. Эти точки на рис. 6 отмечены черным цветом. Все они находятся в области, где погрешность поиска DX_{opt} пренебрежимо мала, а степень овражности $SValley < 1000$. При $ND > 4$ встречались оценки $NValley > 3$, но также только в области $lg(DX_{opt}) < -4$. При $ND = 2$ значения $NValley > 1$, очевидно, невозможны.

Перейдем к статистической обработке собранных в экспериментах данных. Предварительно был выполнен анализ влияния параметров P , W , K функции *TestValley*(..) на степень овражности *SValley*. Исследовалась линейная модель

$$lg(SValley) = k_1P + k_2W + k_3lg(K) + b. \quad (5)$$

Регрессионный анализ этой модели показал, что на степень овражности сильнее всего влияет

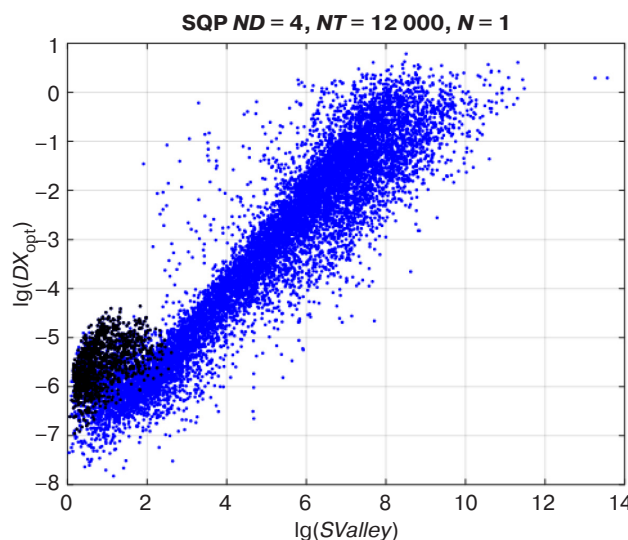


Рис. 6. Диаграмма рассеяния значений логарифмов степени овражности *SValley* и погрешности определения координат минимума DX_{opt}

параметр W , определяющий кривизну и выпуклость или вогнутость склонов оврага. Следующим по вкладу в результат идет параметр K , а влияние параметра P наименее существенно, но все же пренебречь им нельзя. Значения коэффициента детерминации R^2 ,

определяющего адекватность модели [14], для разных ND находились в диапазоне 0.88–0.90.

Далее была рассмотрена линейная модель, связывающая погрешность нахождения точки минимума ЦФ с оценкой степени овражности

$$\lg(DX_{\text{opt}}) = k \lg(S\text{Valley}) + b. \quad (6)$$

Результаты регрессионного анализа приведены в табл. 1, где первая группа столбцов соответствует учету всех точек, а вторая группа – с исключением точек с оценкой $N\text{Valley} > 1$. Этот отбор данных приводит к некоторому улучшению точности модели, выражающемуся в увеличении коэффициента

детерминации R^2 и уменьшению среднеквадратической ошибки (остатка) регрессии $StdErr$.

Далее была исследована возможность повышения точности модели путем учета евклидовой нормы (длины) вектора градиента ЦФ $\|\mathbf{grad}\|$ в точке окончания поиска. Рассматривалась следующая линейная модель

$$\lg(DX_{\text{opt}}) = k_1 \lg(S\text{Valley}) + k_2 \lg(\|\mathbf{grad}\|) + b. \quad (7)$$

Результаты регрессионного анализа этой модели даны в табл. 2. Как и для предыдущей модели, выделены случаи с учетом всех точек и с исключением точек с $N\text{Valley} > 1$. Заметим, что коэффициент

Таблица 1. Результаты регрессионного анализа модели (6)

ND	Все точки				Исключены точки с $N\text{Valley} > 1$			
	b	k	R^2	$StdErr$	b	k	R^2	$StdErr$
2	−6.97	0.564	0.846	0.825	–	–	–	–
3	−6.81	0.675	0.855	0.755	−6.98	0.702	0.856	0.747
4	−6.80	0.714	0.881	0.686	−7.08	0.758	0.885	0.666
5	−6.82	0.744	0.882	0.685	−7.15	0.797	0.884	0.667
6	−6.79	0.756	0.884	0.674	−7.09	0.806	0.885	0.660
7	−6.72	0.757	0.883	0.673	−7.03	0.808	0.886	0.656
8	−6.69	0.766	0.876	0.700	−7.00	0.817	0.878	0.687
9	−6.63	0.764	0.874	0.700	−6.94	0.816	0.877	0.684
10	−6.60	0.772	0.868	0.712	−6.93	0.828	0.869	0.699
11	−6.59	0.777	0.865	0.716	−6.90	0.830	0.868	0.702
12	−6.54	0.779	0.857	0.740	−6.86	0.834	0.859	0.729

Таблица 2. Результаты регрессионного анализа модели (7)

ND	Все точки					Исключены точки с $N\text{Valley} > 1$				
	b	k_1	k_2	R^2	$StdErr$	b	k_1	k_2	R^2	$StdErr$
2	−3.53	0.041	0.526	0.936	0.534	–	–	–	–	–
3	−3.84	0.125	0.464	0.929	0.529	−3.97	0.145	0.469	0.937	0.495
4	−3.91	0.163	0.453	0.935	0.507	−4.08	0.184	0.475	0.950	0.439
5	−4.01	0.196	0.438	0.936	0.502	−4.15	0.209	0.479	0.956	0.411
6	−3.98	0.198	0.442	0.937	0.495	−4.07	0.201	0.490	0.956	0.407
7	−3.95	0.199	0.444	0.938	0.490	−4.06	0.204	0.491	0.959	0.395
8	−3.86	0.184	0.460	0.939	0.492	−3.99	0.196	0.501	0.959	0.398
9	−3.89	0.195	0.451	0.937	0.493	−4.02	0.208	0.492	0.959	0.394
10	−3.84	0.190	0.456	0.937	0.492	−4.02	0.211	0.493	0.958	0.397
11	−3.84	0.194	0.458	0.936	0.494	−4.00	0.212	0.496	0.958	0.397
12	−3.84	0.195	0.454	0.934	0.501	−4.03	0.218	0.490	0.957	0.401

Таблица 3. Результаты аппроксимации с применением моделей ИНС

ND	Аппроксимация по $\lg(SValley)$				По $\lg(SValley)$ и $\lg(\mathbf{grad})$			
	Все точки		Без $NValley > 1$		Все точки		Без $NValley > 1$	
	R^2	$StdErr$	R^2	$StdErr$	R^2	$StdErr$	R^2	$StdErr$
2	0.863	0.777	–	–	0.954	0.451	–	–
3	0.881	0.685	0.877	0.691	0.952	0.437	0.953	0.425
4	0.906	0.609	0.904	0.608	0.959	0.404	0.963	0.378
5	0.904	0.617	0.900	0.618	0.960	0.399	0.966	0.360
6	0.907	0.602	0.904	0.603	0.959	0.402	0.965	0.364
7	0.908	0.598	0.906	0.595	0.961	0.388	0.969	0.341
8	0.903	0.621	0.900	0.622	0.961	0.391	0.970	0.340
9	0.903	0.613	0.901	0.613	0.964	0.376	0.972	0.329
10	0.895	0.634	0.891	0.640	0.960	0.391	0.969	0.339
11	0.891	0.644	0.888	0.648	0.961	0.384	0.970	0.336
12	0.883	0.668	0.879	0.676	0.959	0.398	0.970	0.337

корреляции значений $\lg(||\mathbf{grad}||)$ и $\lg(SValley)$ при разных размерностях пространства ND меняется в пределах от 0.91 до 0.95, т.е. корреляция существенная. Тем не менее, учет нормы градиента дает дополнительную информацию для оценки погрешности DX_{opt} . По сравнению с моделью (6) коэффициент детерминации R^2 стал ближе к единице, а среднеквадратическая погрешность $StdErr$ уменьшилась. При этом исключение точек с ошибочно определенной размерностью оврага, как и в предыдущем случае, улучшает характеристики модели.

Другой подход к аппроксимации зависимостей между данными, собранными в экспериментах, основан на обучении моделей ИНС. Известно, что с помощью ИНС со скрытыми слоями и достаточным количеством нейронов в них можно аппроксимировать любую непрерывную функцию нескольких переменных [15]. Использовалась модель ИНС с одним скрытым слоем, содержащим 5 нейронов. В качестве обучающей выборки использовались те же данные, что и для регрессионного анализа моделей (6) и (7). Использовались настройки функции *MATLAB train(..)*, установленные по умолчанию. Результаты аппроксимации представлены в табл. 3.

Сравнение с результатами из табл. 1 и табл. 2 показывает, что модели ИНС обеспечивают более точную аппроксимацию искомой зависимости

по тем же исходным данным, чем модели линейной регрессии. Отметим, что увеличение числа нейронов до 10 не дало заметного улучшения результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что существует объективная стохастическая зависимость между оценкой степени овражности рельефа ЦФ в окрестности точки окончания поиска минимума и погрешностью определения координат истинного положения минимума ЦФ. Данная зависимость может быть выявлена и зафиксирована в виде уравнения линейной регрессии или в виде обученной модели ИНС, а затем использоваться для оценки ожидаемой погрешности определения координат точки минимума.

Установлено, что модели ИНС обеспечивают более высокую точность предсказания величины погрешности по сравнению с моделями линейной регрессии. Также точность моделей обоих типов повышает учет не только оценки степени овражности, но и евклидовой нормы градиента ЦФ в точке окончания поиска.

В дальнейшем предполагается расширить методику на функции с размерностью оврагов более единицы и на другие типы сложных для алгоритмов оптимизации участков рельефа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. *Практическая оптимизация*; пер. с англ. М.: Мир; 1985. 509 с.
2. Нинул А.С. *Оптимизация целевых функций. Аналитика. Численные методы. Планирование эксперимента*. М.: Изд-во Физико-математической литературы; 2009. 336 с.
3. Карпенко А.П. *Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2017. 446 с.
4. Jasbir S.A. *Introduction to Optimum Design*. 4th edition. Elsevier; 2017. 670 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-15344-5>
5. Mersmann O., Bischl B., Trautmann H., Preuss M., Weihs C., Rudolf G. Exploratory Landscape Analysis. In: *Proceedings of the 13th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO'11)*. 2011. P. 829–836. <https://doi.org/10.1145/2001576.2001690>
6. Kerschke P., Trautmann H. Comprehensive Feature-Based Landscape Analysis of Continuous and Constrained Optimization Problems Using the R-package flacco. In: *Applications in Statistical Computing—From Music Data Analysis to Industrial Quality Improvement. Series: Studies in Classification, Data Analysis, and Knowledge Organization*. Bauer N., Ickstadt K., Lübke K., Szepannek G., Trautmann H., Vichi M. (Eds.). Berlin/Heidelberg, Germany: Springer; 2019. P. 93–123. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25147-5_7
7. Trajanov R., Dimeski S., Popovski M., Korosec P., Eftimov T. *Explainable Landscape-Aware Optimization Performance Prediction*. Preprint. 2021. <https://arxiv.org/pdf/2110.11633v1>
8. Чернолучский И.Г. *Методы оптимизации в теории управления: учебное пособие*. СПб.: Питер; 2004. 256 с.
9. Смирнов А.В. Свойства целевых функций и алгоритмов поиска в задачах многокритериальной оптимизации. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):75–85. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-75-85>
10. He J., Xu T. *New Methods of Studying Valley Fitness Landscapes*. Preprint. 2018. <https://arxiv.org/pdf/1805.00092.pdf>
11. Ochoa G., Veerapen N. Mapping the Global Structure of TSP Fitness Landscapes. *J. Heuristics*. 2018;24(4):265–294. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10732-017-9334-0>
12. Hansen N., Finck S., Ros R., Auger A. *Real-Parameter Black-Box Optimization Benchmarking 2009: Noiseless Functions Definitions*. [Research Report] RR-6829, INRIA. 2009. <https://hal.inria.fr/inria-00362633v2>
13. Jamil M., Yang Xin-She. A literature survey of benchmark functions for global optimization problems. *Int. J. Math. Model. Numer. Opt.* 2013;4(2):150–194. <https://doi.org/10.1504/IJMMNO.2013.055204>
14. Большаков А.А., Каримов Р.Н. *Методы обработки многомерных данных и временных рядов*. М.: Горячая линия–Телеком; 2007. 522 с.
15. Хайкин С. *Нейронные сети: полный курс*; пер. с англ. М.: ООО «И.Д. Вильямс»; 2006. 1104 с.

REFERENCES

1. Gill Ph.E., Murray W., Wright M.H. *Prakticheskaya optimizatsiya (Practical Optimization)*. Transl. from Engl. Moscow: Mir; 1985. 509 p. (in Russ.). [Gill Ph.E., Murray W., Wright M.H. *Practical Optimization*. London: Academic Press; 1981. 402 p.]
2. Ninul A.S. *Optimizatsiya tselevykh funktsii. Analitika. Chislennye metody. Planirovanie eksperimenta (Optimization of Objective Functions. Analytics. Numerical Methods. Desing of Experiments)*. Moscow: Fizmatizdat; 2009. 336 p. (in Russ.).
3. Karpenko A.P. *Sovremennye algoritmy poiskovoi optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennye prirodo: uchebnoe posobie (Modern Search Optimization Algorithms. Nature-Inspired Optimization Algorithms)*. Moscow: Izd. MG TU im. Bauman; 2017. 446 p. (in Russ.).
4. Jasbir S.A. *Introduction to optimum design*. 4th edition. Elsevier; 2017. 670 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-15344-5>
5. Mersmann O., Bischl B., Trautmann H., Preuss M., Weihs C., Rudolf G. Exploratory Landscape Analysis. In: *Proceedings of the 13th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO'11)*. 2011. P. 829–836. <https://doi.org/10.1145/2001576.2001690>
6. Kerschke P., Trautmann H. Comprehensive Feature-Based Landscape Analysis of Continuous and Constrained Optimization Problems Using the R-package flacco. In: *Applications in Statistical Computing—From Music Data Analysis to Industrial Quality Improvement. Series: Studies in Classification, Data Analysis, and Knowledge Organization*. Bauer N., Ickstadt K., Lübke K., Szepannek G., Trautmann H., Vichi M. (Eds.). Berlin/Heidelberg, Germany: Springer; 2019. P. 93–123. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25147-5_7
7. Trajanov R., Dimeski S., Popovski M., Korosec P., Eftimov T. *Explainable Landscape-Aware Optimization Performance Prediction*. Preprint. 2021. <https://arxiv.org/pdf/2110.11633v1>
8. Chernorutskii I.G. *Metody optimizatsii v teorii upravleniya: uchebnoe posobie (Optimization Methods in the Control Theory)*. St. Petersburg: Piter; 2004. 256 p. (in Russ.).
9. Smirnov A.V. Properties of objective functions and search algorithms in multi-objective optimization problems. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):75–85 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-75-85>
10. He J., Xu T. *New Methods of Studying Valley Fitness Landscapes*. Preprint. 2018. <https://arxiv.org/pdf/1805.00092.pdf>
11. Ochoa G., Veerapen N. Mapping the Global Structure of TSP Fitness Landscapes. *J. Heuristics*. 2018;24(4):265–294. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10732-017-9334-0>
12. Hansen N., Finck S., Ros R., Auger A. *Real-Parameter Black-Box Optimization Benchmarking 2009: Noiseless Functions Definitions*. [Research Report] RR-6829, INRIA. 2009. <https://hal.inria.fr/inria-00362633v2>
13. Jamil M., Yang Xin-She. A literature survey of benchmark functions for global optimization problems. *Int. J. Math. Model. Numer. Opt.* 2013;4(2):150–194. <https://doi.org/10.1504/IJMMNO.2013.055204>

14. Bol'shakov A.A., Karimov R.N. *Metody obrabotki mnogomernykh dannykh i vremennykh ryadov (Methods for Processing of Multidimensional Data and Time Series)*. Moscow; Goryachaya Liniya–Telekom; 2007. 522 p. (in Russ.).
15. Haykin S. *Neironnye seti: polnyi kurs (Neural networks. A Comprehensive Foundation)*. Transl. from Engl. Moscow: Vil'yams; 2006. 1104 p. (in Russ.).
[Haykin S. *Neural networks. A Comprehensive Foundation*. Prentice Hall; 1999. 1104 p.]

Об авторе

Смирнов Александр Витальевич, к.т.н., доцент, профессор кафедры телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: av_smirnov@mirea.ru. Scopus Author ID 56380930700, <https://orcid.org/0000-0002-2696-8592>

About the author

Alexander V. Smirnov, Cand. Sci. (Eng.), Professor, Department of Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: av_smirnov@mirea.ru. Scopus Author ID 56380930700, <https://orcid.org/0000-0002-2696-8592>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 517.926
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-68-75>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Свойства определителя Вронского системы решений линейного однородного уравнения: случай, когда число решений меньше порядка уравнения

Д.А. Хрычев @

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
@ Автор для переписки, e-mail: dakford@yandex.ru

Резюме

Цели. Целью работы является изучение свойств определителя Вронского системы решений линейного однородного дифференциального уравнения в случае, когда число решений меньше порядка уравнения, и сравнение их с известными свойствами такого же определителя, но в случае равенства числа решений порядку уравнения.

Методы. В работе использованы методы линейной алгебры и теории обыкновенных дифференциальных уравнений, а также математического и комплексного анализа.

Результаты. Показано, что обращение в нуль рассматриваемого определителя на сколь угодно малом интервале влечет за собой обращение его в нуль на всей области определения, а решения при этом оказываются линейно зависимыми. В трех случаях: 1) если коэффициенты уравнения являются аналитическими функциями, 2) если число решений равно единице и 3) если число решений на единицу меньше порядка уравнения – получен более сильный результат. Именно, если множество нулей рассматриваемого определителя Вронского имеет предельную точку, принадлежащую области определения решений, то определитель тождественно равен нулю и решения линейно зависимы.

Выводы. Полученные результаты означают, что определитель Вронского системы решений линейного однородного уравнения в ситуации, когда число решений меньше порядка уравнения, служит индикатором линейной зависимости или независимости этой системы: решения линейно зависимы тогда и только тогда, когда их определитель Вронского тождественно равен нулю. При этом нет необходимости проверять обращение определителя в нуль на всей области определения, достаточно сделать это на произвольно выбранном интервале или даже (в перечисленных выше частных случаях) на произвольно выбранном множестве, имеющем предельную точку.

Ключевые слова: линейное однородное дифференциальное уравнение, определитель Вронского, нули определителя Вронского, линейная зависимость, линейная независимость

• Поступила: 21.06.2023 • Доработана: 03.07.2023 • Принята к опубликованию: 04.09.2023

Для цитирования: Хрычев Д.А. Свойства определителя Вронского системы решений линейного однородного уравнения: случай, когда число решений меньше порядка уравнения. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):68–75. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-68-75>

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Properties of the Wrońskian determinant of a system of solutions to a linear homogeneous equation: The case when the number of solutions is less than the order of the equation

Dmitry A. Khrychev @

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: dakford@yandex.ru

Abstract

Objectives. The work sets out to study the properties of the Wrońskian determinant of the system of solutions to a linear homogeneous equation in cases when the number of solutions is less than the order of the equation, comparing them with the known properties of the same determinant when the number of solutions is equal to the order of the equation.

Methods. The work uses the methods of linear algebra according to the theory of ordinary differential equations, as well as mathematical and complex analysis.

Results. It is shown that the vanishing of a considered determinant on an arbitrarily small interval implies its vanishing on the entire domain of definition; the solutions turn out to be linearly dependent. A stronger result is obtained in three cases: (1) if the coefficients of the equation are analytic functions; (2) if the number of solutions is equal to one; (3) if the number of solutions is one less than the order of the equation. Namely, if the set of zeros of the considered Wrońskian has a limit point belonging to the domain of definition of solutions, then the determinant is identically equal to zero and the solutions are linearly dependent.

Conclusions. According to the obtained results, the Wrońskian of a system of solutions of a linear homogeneous equation can serve as an indicator of the linear dependence or independence of this system in cases where the number of solutions is lower than the order of the equation; here, the solutions are linearly dependent if and only if their Wrońskian is identically equal to zero. In this case, there is no need to check whether the determinant vanishes over the entire domain of definition, since it is sufficient to do this on an arbitrarily chosen interval or even (in the special cases listed above) on an arbitrarily chosen set having a limit point.

Keywords: linear homogeneous differential equation, Wrońskian, zeros of the Wrońskian, linear dependence, linear independence

• Submitted: 21.06.2023 • Revised: 03.07.2023 • Accepted: 04.09.2023

For citation: Khrychev D.A. Properties of the Wrońskian determinant of a system of solutions to a linear homogeneous equation: The case when the number of solutions is less than the order of the equation. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):68–75. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-68-75>

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

Одним из основных инструментов математического моделирования являются обыкновенные дифференциальные уравнения, которые служат моделями для описания самых разнообразных явлений и процессов [1–5]. В свою очередь, важным

инструментом исследования дифференциальных уравнений, прежде всего в плане проверки линейной зависимости или независимости их решений, является определитель Вронского.

Напомним, что определителем Вронского системы функций $y_1(x), y_2(x), \dots, y_k(x)$, $x \in (a, b)$, называется функция

$$W(x) = W_{y_1, y_2, \dots, y_k}(x) = \begin{vmatrix} y_1(x) & y_2(x) & \dots & y_k(x) \\ y_1'(x) & y_2'(x) & \dots & y_k'(x) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_1^{(k-1)}(x) & y_2^{(k-1)}(x) & \dots & y_k^{(k-1)}(x) \end{vmatrix}. \quad (1)$$

Теория определителей Вронского излагается практически в каждом учебнике по обыкновенным дифференциальным уравнениям [6–12], при этом речь в них идет, за малым исключением, об определителях, составленных по n решениям линейного однородного уравнения порядка n . Такие определители обладают замечательными свойствами, позволяющими использовать их как индикаторы линейной зависимости или независимости рассматриваемой системы решений. Именно, система n решений линейного однородного уравнения порядка n линейно зависима тогда и только тогда, когда определитель Вронского этой системы тождественно равен нулю, и линейно независима тогда и только тогда, когда ее определитель Вронского не равен нулю ни в одной точке области определения рассматриваемых решений. При этом хорошо известно (см. соответствующие примеры в [6, 9, 12]), что для определителя Вронского системы функций, не являющихся решениями линейного однородного уравнения, ситуация совершенно иная: определитель может обращаться в нуль, причем даже тождественно, при том, что функции являются линейно независимыми. Т.е. если определитель Вронского некоторой системы функций окажется тождественно равным нулю, мы не получим с его помощью ответа на вопрос о линейной зависимости или независимости этой системы.

Возникает естественный вопрос: сохраняются ли «хорошие» свойства определителя Вронского системы решений линейного однородного уравнения порядка n , если вместо n мы возьмем $k < n$ решений? Можно ли определитель Вронского такой системы столь же эффективно использовать для выяснения ее линейной зависимости или независимости? Вопрос этот сформулирован, например, в [9], при этом изучение его ограничилось приведением примера, показывающего, что определитель Вронского линейно независимой системы из $k < n$ решений (в примере $k = 2$ и $n = 3$), в отличие от линейно независимой системы из n решений, может обращаться в нуль в каких-то точках его области определения.

Несложно привести пример, причем для произвольных n и $k < n$, когда определитель Вронского линейно независимой системы решений обращается в нуль даже в бесконечном множестве точек. Рассмотрим уравнение $y^{(n)} + y^{(n-2)} = 0$, фундаментальную систему решений которого составляют

функции $1, x, x^2, \dots, x^{n-3}, \sin x, \cos x$. Для произвольного $k \leq n - 1$ возьмем набор из k решений $1, x, x^2, \dots, x^{k-2}, \sin x$ (для $k = 1$ берем одно решение $\sin x$), определитель Вронского которого с точностью до числового множителя совпадает либо с $\sin x$, либо с $\cos x$ и, значит, имеет бесконечное множество нулей на числовой оси.

Определитель Вронского системы из $(n - 1)$ -го решения линейного однородного уравнения порядка n изучался в работе [13], где, в частности, было показано, что в случае линейной независимости такой системы ее определитель Вронского не может иметь бесконечное число нулей ни на одном конечном отрезке.

В настоящей работе рассматривается случай произвольного числа решений, меньшего порядка уравнения n . Основной результат содержится в теореме 1, утверждающей, что равенство нулю определителя Вронского такой системы решений на каком-нибудь интервале влечет ее линейную зависимость. Таким образом, в случае линейной независимости решений определитель Вронского не может обращаться в нуль ни на одном, даже сколь угодно малом, интервале.

В теореме 2 показано, что в ряде частных случаев, в т.ч. и в упомянутом выше случае $k = n - 1$, этот результат может быть усилен. Именно, множество нулей определителя Вронского линейно независимой системы решений не может иметь предельных точек на его области определения, и, значит, не может иметь бесконечного числа нулей ни на одном конечном отрезке. Для случая $k = n - 1$ приводится доказательство, отличное от содержащегося в [13] и позволяющее ослабить условия на коэффициенты уравнения.

Таким образом, можно сказать, что определитель Вронского системы из $k < n$ решений линейного однородного уравнения порядка n по своим свойствам занимает промежуточное положение между определителем Вронского произвольной системы функций и определителем Вронского системы из n решений, причем эти свойства позволяют использовать такой определитель для выяснения линейной зависимости или независимости рассматриваемой системы решений.

ОСНОВНОЙ РЕЗУЛЬТАТ

Рассмотрим линейное однородное уравнение n -го порядка:

$$y^{(n)} + a_{n-1}(x)y^{(n-1)} + \dots + a_0(x)y = 0, \quad (2)$$

коэффициенты которого $a_{n-1}(x), \dots, a_0(x) \in C(a, b)$, $-\infty \leq a < b \leq +\infty$. Как известно, любое решение такого

уравнения продолжается на весь интервал (a, b) . Далее будем рассматривать только решения, заданные на (a, b) .

Пусть $y_1(x), y_2(x), \dots, y_k(x)$ – решения уравнения (2), $k \leq n-1$, $W_{y_1, y_2, \dots, y_k}(x)$ – их определитель Вронского (1). Мы будем рассматривать также определители вида

$$W_{y_1, y_2, \dots, y_k}^{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k}(x) = \begin{vmatrix} y_1^{(\alpha_1)}(x) & y_2^{(\alpha_1)}(x) & \dots & y_k^{(\alpha_1)}(x) \\ y_1^{(\alpha_2)}(x) & y_2^{(\alpha_2)}(x) & \dots & y_k^{(\alpha_2)}(x) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_1^{(\alpha_k)}(x) & y_2^{(\alpha_k)}(x) & \dots & y_k^{(\alpha_k)}(x) \end{vmatrix},$$

где $0 \leq \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k \leq n$. Понятно, что если среди чисел $\alpha_1, \dots, \alpha_k$ есть совпадающие, то $W_{y_1, y_2, \dots, y_k}^{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k}(x) \equiv 0$. Определители $W_{y_1, y_2, \dots, y_k}^{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k}$, у которых $0 \leq \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_k \leq n-1$, будем называть *обобщенными определителями Вронского*. Очевидно, имеется ровно C_n^k различных обобщенных определителей Вронского системы из k решений, включая сам определитель Вронского $W_{y_1, y_2, \dots, y_k} = W_{y_1, y_2, \dots, y_k}^{0, 1, \dots, k-1}$. Заметим, что в случае линейной зависимости системы решений $y_1, y_2, \dots, y_k$ на некотором интервале $(\alpha, \beta) \subset (a, b)$ (а значит, в силу теоремы единственности решения задачи Коши, и на всем интервале (a, b)) все ее обобщенные определители Вронского тождественно равны нулю на (a, b) .

ЛЕММА 1. Пусть $y_1, y_2, \dots, y_k, k \leq n-1$ – решения уравнения (2), и пусть определитель $W_{y_1, y_2, \dots, y_k}(x)$ тождественно равен нулю на некотором интервале $(\alpha, \beta) \subset (a, b)$. Тогда для произвольного решения y_{k+1} все обобщенные определители Вронского системы решений $y_1, y_2, \dots, y_{k+1}$ тождественно равны нулю на (a, b) .

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО проведем индукцией по k . Для $k=1$ утверждение справедливо в силу теоремы единственности решения задачи Коши. Предположим, что оно верно для некоторого $k \leq n-2$, и докажем справедливость его для $k+1$.

Пусть $y_1, y_2, \dots, y_{k+1}$ – решения (2) и

$$W_{y_1, \dots, y_{k+1}}(x) = 0 \quad \forall x \in (\alpha, \beta) \subset (a, b). \quad (3)$$

Возьмем определитель на единицу меньшего порядка $W_{y_1, \dots, y_k}(x)$. Возможны два варианта: либо $W_{y_1, \dots, y_k}(x) \equiv 0$ на интервале (α, β) , либо в некоторой точке $x_0 \in (\alpha, \beta)$ $W_{y_1, \dots, y_k}(x_0) \neq 0$. Рассмотрим эти случаи.

1. Пусть $W_{y_1, \dots, y_k}(x) = 0 \quad \forall x \in (\alpha, \beta)$. Тогда по индуктивному предположению все обобщенные

определители Вронского решений $y_1, y_2, \dots, y_{k+1}$ тождественно равны нулю на (a, b) . Возьмем произвольное решение y_{k+2} и рассмотрим обобщенный определитель Вронского $W_{y_1, \dots, y_{k+2}}^{\alpha_1, \dots, \alpha_{k+2}}$. Разлагая его по последнему столбцу, получим:

$$\begin{aligned} W_{y_1, \dots, y_{k+2}}^{\alpha_1, \dots, \alpha_{k+2}}(x) &= \begin{vmatrix} y_1^{(\alpha_1)}(x) & y_2^{(\alpha_1)}(x) & \dots & y_{k+2}^{(\alpha_1)}(x) \\ y_1^{(\alpha_2)}(x) & y_2^{(\alpha_2)}(x) & \dots & y_{k+2}^{(\alpha_2)}(x) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_1^{(\alpha_{k+2})}(x) & y_2^{(\alpha_{k+2})}(x) & \dots & y_{k+2}^{(\alpha_{k+2})}(x) \end{vmatrix} = \\ &= (-1)^{k+3} y_{k+2}^{(\alpha_1)}(x) W_{y_1, \dots, y_{k+1}}^{\alpha_2, \dots, \alpha_{k+2}}(x) + \\ &+ (-1)^{k+4} y_{k+2}^{(\alpha_2)}(x) W_{y_1, \dots, y_{k+1}}^{\alpha_1, \alpha_3, \dots, \alpha_{k+2}}(x) + \dots + \\ &+ y_{k+2}^{(\alpha_{k+2})}(x) W_{y_1, \dots, y_{k+1}}^{\alpha_1, \dots, \alpha_{k+1}}(x) = 0 \quad \forall x \in (a, b), \end{aligned}$$

и тем самым утверждение леммы доказано.

2. Пусть теперь $W_{y_1, \dots, y_k}(x_0) \neq 0$ в точке $x_0 \in (\alpha, \beta)$. Тогда в силу непрерывности $W_{y_1, \dots, y_k}(x) \neq 0$ на некотором содержащем точку x_0 интервале (α_1, β_1) . Покажем, что на этом интервале функции $y_1, y_2, \dots, y_{k+1}$ линейно зависимы.

В силу (3) в каждой точке $x \in (\alpha, \beta)$ столбцы определителя $W_{y_1, \dots, y_{k+1}}(x)$ линейно зависимы, т.е. существует набор не равных одновременно нулю чисел $\lambda_1(x), \lambda_2(x), \dots, \lambda_{k+1}(x)$ (вообще говоря, свой для каждой точки x), такой что

$$\begin{cases} \lambda_1(x)y_1(x) + \dots + \lambda_{k+1}(x)y_{k+1}(x) = 0, \\ \dots \\ \lambda_1(x)y_1^{(k)}(x) + \dots + \lambda_{k+1}(x)y_{k+1}^{(k)}(x) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Заметим, что при $x \in (\alpha_1, \beta_1)$ $\lambda_{k+1}(x) \neq 0$. Действительно, в противном случае из первых k равенств (4) получим

$$\begin{cases} \lambda_1(x)y_1(x) + \dots + \lambda_k(x)y_k(x) = 0, \\ \dots \\ \lambda_1(x)y_1^{(k-1)}(x) + \dots + \lambda_k(x)y_k^{(k-1)}(x) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

откуда $\lambda_1(x) = \lambda_2(x) = \dots = \lambda_k(x) = 0$, поскольку определителем системы (5) является не равный нулю на интервале (α_1, β_1) определитель $W_{y_1, \dots, y_k}(x)$.

Для каждого $x \in (\alpha_1, \beta_1)$ разрешим уравнения системы (4) относительно функции y_{k+1} и ее производных:

$$\begin{cases} y_{k+1}(x) = \mu_1(x)y_1(x) + \dots + \mu_k(x)y_k(x), \\ y'_{k+1}(x) = \mu_1(x)y'_1(x) + \dots + \mu_k(x)y'_k(x), \\ \dots \\ y_{k+1}^{(k)}(x) = \mu_1(x)y_1^{(k)}(x) + \dots + \mu_k(x)y_k^{(k)}(x), \end{cases} \quad (6)$$

где $\mu_i(x) = -\lambda_i(x)/\lambda_{k+1}(x)$, $i = \overline{1, k}$. Рассматривая первые k равенств в (6) как систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных $\mu_1(x), \dots, \mu_k(x)$, причем все с тем же ненулевым определителем $W_{y_1, \dots, y_k}(x)$, получим

$$\mu_i(x) = \frac{W_{y_1, \dots, y_{i-1}, y_{k+1}, y_{i+1}, \dots, y_k}(x)}{W_{y_1, \dots, y_k}(x)}, \quad i = \overline{1, k},$$

откуда, в частности, следует, что $\mu_i(x) \in C^1(\alpha_1, \beta_1)$.

Далее поступим следующим образом. Про дифференцируем обе части первого уравнения из (6) и из полученного равенства вычтем второе уравнение: $0 = \mu'_1(x)y_1(x) + \dots + \mu'_k(x)y_k(x)$, $x \in (\alpha_1, \beta_1)$. То же самое сделаем со вторым и третьим уравнением, третьим и четвертым и т.д. В итоге получим однородную систему уравнений относительно производных $\mu'_1(x), \dots, \mu'_k(x)$:

$$\begin{cases} 0 = \mu'_1(x)y_1(x) + \dots + \mu'_k(x)y_k(x), \\ 0 = \mu'_1(x)y'_1(x) + \dots + \mu'_k(x)y'_k(x), \\ \dots \\ 0 = \mu'_1(x)y_1^{(k-1)}(x) + \dots + \mu'_k(x)y_k^{(k-1)}(x), \end{cases}$$

определителем которой снова является $W_{y_1, \dots, y_k}(x) \neq 0$. Отсюда заключаем, что $\mu'_1(x) = \dots = \mu'_k(x) = 0 \quad \forall x \in (\alpha_1, \beta_1)$, а значит $\mu_1(x), \dots, \mu_k(x)$ суть константы. Поэтому в силу первого равенства из (6) решения $y_1, y_2, \dots, y_{k+1}$ оказываются линейно зависимыми на интервале (α_1, β_1) и, следовательно, на (a, b) . Если теперь взять произвольное решение y_{k+2} , то все обобщенные определители Вронского линейно зависимой системы $y_1, \dots, y_{k+1}, y_{k+2}$ будут тождественно равняться нулю на (a, b) . Лемма доказана.

Теперь несложно установить основной результат работы.

ТЕОРЕМА 1. Пусть $y_1(x), y_2(x), \dots, y_k(x)$, $k \leq n - 1$ – решения уравнения (2), и пусть $W_{y_1, \dots, y_k}(x) = 0 \quad \forall x \in (\alpha, \beta) \subset (a, b)$. Тогда функции $y_1, y_2, \dots, y_k$ линейно зависимы на интервале (a, b) .

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Предположим, что решения $y_1, y_2, \dots, y_k$ линейно независимы. Дополним систему $y_1, y_2, \dots, y_k$ до фундаментальной системы решений $y_1, y_2, \dots, y_k, y_{k+1}, \dots, y_n$ уравнения (2).

Применяя последовательно лемму 1, заключаем, что $W_{y_1, \dots, y_{k+1}}(x) \equiv 0$, $W_{y_1, \dots, y_{k+2}}(x) \equiv 0$, $\dots$, $W_{y_1, \dots, y_n}(x) \equiv 0$ на (a, b) . Но равенство нулю определителя Вронского системы n решений даже в одной точке означает их линейную зависимость. Полученное противоречие доказывает теорему.

ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ

Следующий результат показывает, что в ряде случаев для линейной зависимости решений $y_1, y_2, \dots, y_k$ достаточно обращения в нуль определителя Вронского $W_{y_1, \dots, y_k}(x)$ на множестве, имеющем предельную точку.

ТЕОРЕМА 2. Пусть множество нулей определителя Вронского $W_{y_1, \dots, y_k}(x)$ решений $y_1(x), y_2(x), \dots, y_k(x)$, $k \leq n - 1$, уравнения (2) имеет предельную точку $x_0 \in (a, b)$. Пусть, далее, выполнено одно из следующих условий: (а) коэффициенты уравнения (2) – аналитические функции (в частности, коэффициенты постоянны) на интервале (a, b) ; (б) $k = 1$; (в) $k = n - 1$, а коэффициенты уравнения (2) удовлетворяют следующим условиям гладкости:

$$a_0(x) \in C(a, b), \quad a_l(x) \in C^{l-1}(a, b),$$

$$l = 1, 2, \dots, n - 2, \quad a_{n-1}(x) \in C^{n-3}(a, b).$$

Тогда решения $y_1, y_2, \dots, y_k$ линейно зависимы на (a, b) .

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. В случае выполнения условия (а) все решения уравнения (2) являются аналитическими на интервале (a, b) функциями ([14], гл. 1, § 6), а потому и определитель Вронского $W_{y_1, \dots, y_k}(x)$ аналитичен на (a, b) . По теореме единственности для аналитических функций ([15], гл. I, § 5, п. 20) $W_{y_1, \dots, y_k}(x) \equiv 0$ на интервале (a, b) , и остается сослаться на теорему 1.

Пусть выполнено условие (б), т.е. $k = 1$. Определитель Вронского одного решения суть само это решение, поэтому наше утверждение является очевидным следствием теоремы единственности решения задачи Коши.

Рассмотрим, наконец, случай (в). Заметим, что результатом дифференцирования любого обобщенного определителя Вронского $W_{y_1, \dots, y_k}^{\alpha_1, \dots, \alpha_k}$ является линейная комбинация некоторого набора обобщенных определителей Вронского тех же решений $y_1, y_2, \dots, y_k$. Действительно, если в нашем определителе $\alpha_k < n - 1$, то

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} W_{y_1, y_2, \dots, y_k}^{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k} &= W_{y_1, y_2, \dots, y_k}^{\alpha_1+1, \alpha_2, \dots, \alpha_k} + \\ &+ W_{y_1, y_2, \dots, y_k}^{\alpha_1, \alpha_2+1, \dots, \alpha_k} + \dots + W_{y_1, y_2, \dots, y_k}^{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k+1}, \end{aligned} \quad (7)$$

причем какие-то из полученных определителей могут оказаться равными нулю ввиду наличия в них совпадающих строк. Если же $\alpha_k = n - 1$, то в последней строке последнего определителя в (7) будут стоять уже n -е производные функций $y_1, y_2, \dots, y_k$. Заменяя n -ю производную каждого решения линейной комбинацией производных меньшего порядка в силу уравнения (2), получим

$$W_{y_1, y_2, \dots, y_k}^{\alpha_1, \dots, \alpha_{k-1}, n} = -a_{n-1} W_{y_1, y_2, \dots, y_k}^{\alpha_1, \dots, \alpha_{k-1}, n-1} - a_{n-2} W_{y_1, y_2, \dots, y_k}^{\alpha_1, \dots, \alpha_{k-1}, n-2} - \dots - a_0 W_{y_1, y_2, \dots, y_k}^{\alpha_1, \dots, \alpha_{k-1}, 0}. \quad (8)$$

Каждый из стоящих в правой части (8) определителей либо равен нулю, либо с точностью до знака совпадает с одним из обобщенных определителей Вронского решений $y_1, \dots, y_k$.

Применим сделанные наблюдения к случаю $k = n - 1$. Заметим, что существует ровно n различных обобщенных определителей Вронского решений $y_1, \dots, y_{n-1}$ уравнения (2): сам определитель Вронского $W_{y_1, \dots, y_{n-1}} = W_{y_1, \dots, y_{n-1}}^{0, 1, \dots, n-2}$, определители вида $W_{y_1, \dots, y_{n-1}}^{0, 1, \dots, l-1, l+1, \dots, n-1}$, $l = \overline{1, n-2}$, и, наконец, $W_{y_1, \dots, y_{n-1}}^{1, 2, \dots, n-1} = W_0$. Упростим обозначения, положив $W_{y_1, \dots, y_{n-1}} = W$, $W_{y_1, \dots, y_{n-1}}^{0, 1, \dots, l-1, l+1, \dots, n-1} = W_l$ и $W_{y_1, \dots, y_{n-1}}^{1, 2, \dots, n-1} = W_0$. Дифференцируя определители W и W_l согласно формулам (7) и (8) и отбрасывая возникающие при этом равные нулю определители, получим:

$$W' = W_{n-2}, \quad (9)$$

$$W'_l = W_{l-1} - a_{n-1} W_l - (-1)^{n-l} a_l W, \quad (10)$$

$$l = \overline{n-2, 1}.$$

Покажем теперь, что производные определителя Вронского W порядка от 2 до $n - 1$ выражаются через обобщенные определители Вронского с помощью формул:

$$W^{(j)} = W_{n-j-1} + \sum_{l=n-j}^{n-2} \alpha_{jl}(x) W_l + \beta_j(x) W, \quad (11)$$

$$j = \overline{2, n-1},$$

где функции $\alpha_{jl}(x), \beta_j(x) \in C^{n-j-1}(a, b)$ (выражение для первой производной у нас уже есть – формула (9)).

Действительно, формулу для W'' получим, дифференцируя (9) и заменяя W'_{n-2} согласно (10):

$W'' = W_{n-3} - a_{n-1} W_{n-2} - a_{n-2} W$, что соответствует (11), причем коэффициенты при определителях в правой части являются функциями класса $C^{n-3}(a, b)$ в силу условия теоремы. Далее, если предположить, что формула (11) верна для некоторого j , $2 \leq j \leq n - 2$, то, дифференцируя обе ее части и пользуясь (10), получим:

$$W^{(j+1)} = W_{n-j-2} - a_{n-1} W_{n-j-1} - (-1)^{j+1} a_{n-j-1} W + \sum_{l=n-j}^{n-2} [\alpha'_{jl} W_l + \alpha_{jl} (W_{l-1} - a_{n-1} W_l - (-1)^{n-l} a_l W)] + \beta'_j W + \beta_j W_{n-2} = W_{n-j-2} + \sum_{l=n-j-1}^{n-2} \alpha_{j+1, l} W_l + \beta_{j+1} W,$$

где $\alpha_{j+1, n-j-1} = -a_{n-1} + \alpha_{j, n-j}$, $\alpha_{j+1, l} = \alpha'_{jl} - \alpha_{jl} a_{n-1} + \alpha_{j, l+1}$, $l = n-j, n-j+1, \dots, n-3$ (для $j \geq 3$),
 $\alpha_{j+1, n-2} = \alpha'_{j, n-2} - \alpha_{j, n-2} a_{n-1} + \beta_j$,
 $\beta_{j+1} = (-1)^j a_{n-j-1} - \sum_{l=n-j}^{n-2} (-1)^{n-l} \alpha_{jl} a_l + \beta'_j$.

Легко видеть, что в силу индуктивного предположения и условий теоремы относительно гладкости коэффициентов уравнения $\alpha_{j+1, l}, \beta_{j+1} \in C^{n-j-2}(a, b)$, и тем самым (11) доказано.

Положим теперь в (9) и (11) $x = x_0$. Точка x_0 , являясь предельной для нулей функции $W(x)$, является таковой, в силу теоремы Ролля, и для нулей ее производных $W'(x), \dots, W^{(n-1)}(x)$. Отсюда в силу непрерывности $W(x_0) = W'(x_0) = \dots = W^{(n-1)}(x_0) = 0$. Получаем линейную однородную систему алгебраических уравнений относительно неизвестных $W_{n-2}(x_0), W_{n-3}(x_0), \dots, W_0(x_0)$ с отличным от нуля треугольным определителем:

$$0 = W_{n-2}(x_0),$$

$$0 = W_{n-j-1}(x_0) + \sum_{l=n-j}^{n-2} \alpha_{jl}(x_0) W_l(x_0),$$

$$j = \overline{2, n-1},$$

откуда $W_{n-2}(x_0) = W_{n-3}(x_0) = \dots = W_0(x_0) = 0$.

Далее пользуемся уже знакомым нам приемом: предположив, что решения $y_1, \dots, y_{n-1}$ линейно независимы, добавляем к ним еще одно решение для получения фундаментальной системы решений $y_1, \dots, y_{n-1}, y_n$ и, разлагая определитель $W_{y_1, \dots, y_n}$ по последнему столбцу, получаем $W_{y_1, \dots, y_n}(x_0) = 0$, что означает линейную зависимость $y_1, \dots, y_n$. Полученное противоречие

доказывает линейную зависимость решений $y_1, \dots, y_{n-1}$. Теорема доказана.

СЛЕДСТВИЕ. Пусть $y_1(x), y_2(x), \dots, y_k(x)$, $x \in (a, b)$ – линейно независимые решения уравнения (2). Тогда их определитель Вронского $W(x) = W_{y_1, y_2, \dots, y_k}(x)$ не может тождественно обращаться в нуль ни на одном интервале $(\alpha, \beta) \subset (a, b)$. Если же выполнено одно из условий (а), (б) или (в) теоремы 2, то множество нулей определителя $W(x)$ не может иметь предельных точек на интервале (a, b) , или, что эквивалентно, $W(x)$ не может иметь бесконечного числа нулей ни на одном отрезке $[\alpha, \beta] \subset (a, b)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из изложенных выше результатов следует, что определитель Вронского системы решений линейного однородного уравнения в ситуации, когда число решений меньше порядка уравнения, может использоваться для проверки линейной зависимости или независимости этой системы: решения линейно зависимы тогда и только тогда, когда их определитель Вронского тождественно равен нулю, и независимы, если определитель отличен от нуля хотя бы в одной точке. При этом, как показывают теоремы 1 и 2, проверка тождественного равенства нулю определителя Вронского на всей области определения может быть заменена проверкой равенства его нулю на существенно меньшем множестве, что облегчает практическое применение полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самарский А.А., Михайлов А.П. *Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры*. М.: Физматлит; 2005. 320 с.
2. Амелькин В.В. *Дифференциальные уравнения в приложениях*. М.: URSS; 2021. 206 с.
3. Эндриус Дж., Мак-Лоун Р. (ред.). *Математическое моделирование*; пер. с англ. М.: Мир; 1979. 278 с.
4. Saaty T.L., Alexander J.M. *Thinking with Models: Mathematical Models in the Physical, Biological and Social Sciences*. N.Y.: Pergamon Press; 1981. 187 p.
5. Gershenfeld N.A. *The Nature of Mathematical Modeling*. Cambridge University Press; 1998. 356 p.
6. Петровский И.Г. *Лекции по теории обыкновенных дифференциальных уравнений*. М.: URSS; 2022. 240 с.
7. Камке Э. *Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям*. СПб.: Лань; 2003. 576 с.
8. Романко В.К. *Курс дифференциальных уравнений и вариационного исчисления*. М.: Лаборатория знаний; 2022. 344 с.
9. Филиппов А.Ф. *Введение в теорию дифференциальных уравнений*. М.: URSS; 2022. 248 с.
10. Понтрягин Л.С. *Обыкновенные дифференциальные уравнения*. М.: URSS; 2023. 336 с.
11. Арнольд В.И. *Обыкновенные дифференциальные уравнения*. М.: Наука; 1984. 272 с.
12. Эльсгольд Л.Э. *Дифференциальные уравнения*. М.: URSS; 2023. 312 с.
13. Марченко Е.П. Свойства определителя Вронского системы функций, состоящей из $(n-1)$ -го решения линейного однородного уравнения порядка n . *Научный альманах*. 2017;10–2(36):155–167. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30675761>
14. Голубев В.В. *Лекции по аналитической теории дифференциальных уравнений*. М.: URSS; 2021. 440 с.
15. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. *Методы теории функций комплексного переменного*. М.: Лань; 2002. 688 с.

REFERENCES

1. Samarskii A.A., Mikhailov A.P. *Principles of Mathematical Modeling: Ideas, Methods, Examples*. London, New York: Taylor & Francis; 2012. 349 p. [Original Russian Text: Samarskii A.A., Mikhailov A.P. *Matematicheskoe modelirovanie: Idei. Metody. Primery* (Principles of Mathematical Modeling: Ideas, Methods, Examples). Moscow: Fizmatlit; 2005. 320 p. (in Russ.).]
2. Amel'kin V.V. *Differentsial'nye uravneniya v prilozheniyakh* (Differential Equations in Applications). Moscow: URSS; 2021. 206 p. (in Russ.).
3. Andrews J.G., McLone R.R. (Eds.). *Matematicheskoe modelirovanie* (Mathematical Modeling). Transl. from Engl. Moscow; Mir; 1979. 278 p. (in Russ.). [Andrews J.G., McLone R.R. (Eds.). *Mathematical Modeling*. London, Boston: Butterworths; 1976. 260 p.]
4. Saaty T.L., Alexander J.M. *Thinking with Models: Mathematical Models in the Physical, Biological and Social Sciences*. N.Y.: Pergamon Press; 1981. 187 p.
5. Gershenfeld N.A. *The Nature of Mathematical Modeling*. Cambridge University Press; 1998. 356 p.
6. Petrovskii I.G. *Lektsii po teorii obyknovennykh differentsial'nykh uravnenii* (Lectures on the Theory of Ordinary Differential Equations). Moscow: URSS; 2022. 240 p. (in Russ.).
7. Kamke E. *Spravochnik po obyknovennym differentsial'nykh uravneniyam* (Handbook of Ordinary Differential Equations). St. Petersburg: Lan; 2003. 576 p. (in Russ.).
8. Romanko V.K. *Kurs differentsial'nykh uravnenii i variatsionnogo ischisleniya* (Course of Differential Equations and Calculus of Variations). Moscow: Laboratoriya znaniy; 2022. 344 p. (in Russ.).
9. Filippov A.F. *Vvedenie v teoriyu differentsial'nykh uravnenii* (Introduction to the Theory of Differential Equations). M.: URSS; 2022. 248 p. (in Russ.).
10. Pontryagin L.S. *Obyknovennye differentsial'nye uravneniya* (Ordinary Differential Equations). Moscow: URSS; 2023. 336 p. (in Russ.).

11. Arnold V.I. *Ordinary Differential Equations*. Verlag, Berlin, Heidelberg: Springer; 1992. 338 p.
[Original Russian Text: Arnold V.I. *Obyknovennye differentsial'nye uravneniya (Ordinary Differential Equations)*. Moscow: Nauka; 1984. 272 p. (in Russ.)]
12. Elsgolts L.E. *Differentsial'nye uravneniya (Differential equations)*. M.: URSS; 2023. 312 p. (in Russ.).
13. Marchenko E.P. Properties of the Wronskian system functions consisting of the $(n-1)$ th solution of a linear homogeneous equation of order n . *Nauchnyi almanakh = Science Almanac*. 2017;10–2(36):155–167 (in Russ.). Available from URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30675761>
14. Golubev V.V. *Lektsii po analiticheskoi teorii differentsial'nykh uravnenii (Lectures on the Analytical Theory of Differential Equations)*. M.: URSS; 2021. 440 p. (in Russ.).
15. Lavrentiev M.A., Shabat B.V. *Metody teorii funktsii kompleksnogo peremennogo (Methods of the Theory of Functions of a Complex Variable)*. M.: Lan; 2002. 688 p. (in Russ.).

Об авторе

Хрычев Дмитрий Аркадьевич, к.ф.-м.н., доцент, кафедра высшей математики Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: dakford@yandex.ru. Scopus Author ID 6507535823, <https://orcid.org/0009-0006-0472-9845>

About the author

Dmitry A. Khrychev, 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: dakford@yandex.ru. Scopus Author ID 6507535823, <https://orcid.org/0009-0006-0472-9845>

Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств.
Управление в организационных системах
Economics of knowledge-intensive and high-tech enterprises and industries.
Management in organizational systems

УДК 330.322.5
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-76-88>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Оценка эффектов реализации проектов развития производственной системы (на примере АО «Лыткаринский завод оптического стекла»)

М.А. Абдулкадыров^{1, 2}, А.Н. Игнатов¹, Н.Н. Куликова^{2, @}, Е.С. Митяков²

¹ АО «Лыткаринский завод оптического стекла», Московская область, г. Лыткарино, 140080 Россия

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: kulikova@mirea.ru

Резюме

Цели. Результативное импортозамещение возможно только за счет создания и использования эффективных отечественных производственных мощностей. Цель исследования состоит в разработке и обосновании методики интегральной оценки эффектов, полученных от проектов по внедрению нового оборудования, включая проекты по импортозамещению.

Методы. Основой исследования явились системный и диалектический подходы, а также методы системного, компаративного, экономико-математического и статистического анализа.

Результаты. В работе предложена методика интегральной оценки эффектов реализации проектов развития производственной системы. С целью получения синтетической оценки разработана система показателей для исследования эффектов проектов развития производственной системы – проектов по внедрению нового оборудования. Эффекты от внедрения нового оборудования подразделяются на внутренние и внешние эффекты различной природы: эффект развития потенциала, социально-экономические, эффект импортозамещения, общественные, экологические. При этом индикаторами эффектов являются не текущие значения показателей, а их изменения в динамике. Комплексное рассмотрение эффектов позволяет расширить существующие критерии принятия решений при реализации проектов по развитию производственной системы, что позволяет оценить воздействие и на предприятие, и на общество в целом. Авторы определяют количественные и качественные показатели для каждой группы эффектов. На базе авторской системы показателей разработана методика компаративного сопоставления показателей с использованием нормированных индексов и обоснован расчет обобщенного показателя. Предложенная система показателей была успешно апробирована на наукоемком предприятии АО «Лыткаринский завод оптического стекла» при оценке эффектов от внедрения нового отечественного прибора для развития производственной системы.

Выводы. Результаты апробации методики позволили обосновать применение разноплановых показателей для количественной и качественной оценки эффектов от внедрения наукоемких проектов, включая проекты по импортозамещению техники и оборудования. Совокупность различных эффектов будет проявляться для любой социально-экономической системы, поэтому предлагаемая методика для оценки эффектов является в определенной мере универсальной и может быть адаптирована для научно-технических и технологических проектов по импортозамещению любого промышленного предприятия.

Ключевые слова: эффект, развитие, импортозамещение, проект, система показателей, интегральный индекс

• Поступила: 31.03.2023 • Доработана: 15.05.2023 • Принята к опубликованию: 04.09.2023

Для цитирования: Абдулкадыров М.А., Игнатов А.Н., Куликова Н.Н., Митяков Е.С. Оценка эффектов реализации проектов развития производственной системы (на примере АО «Лыткаринский завод оптического стекла»). *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):76–88. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-76-88>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Assessment of the effects of production system development projects: Case study of Lytkarino Optical Glass Factory

Magomed A. Abdulkadyrov ^{1, 2}, Alexander N. Ignatov ¹, Natalia N. Kulikova ^{2, @},
Evgeniy S. Mityakov ²

¹ Lytkarino Optical Glass Factory, Moscow oblast, Lytkarino, 140080 Russia

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: kulikova@mirea.ru

Abstract

Objectives. Effective import substitution can be achieved only through the creation and use of efficient domestic production capacities. The aim of this study is to develop and justify a method for the integrated assessment of the effects of projects aimed at the introduction of new equipment, including import substitution projects.

Methods. The research was based on systemic and dialectical approaches, as well as systemic, comparative, economic and mathematical methods, and statistical analysis.

Results. The paper proposes a method for the integrated assessment of production system development projects. In order to obtain a synthetic assessment, a system of indicators was developed to study the effects of production system development projects, i.e., projects for the introduction of new equipment. The effects of the introduction of new equipment can be divided into internal and external: potential development, socioeconomic, import independence, public, and environmental. The indicators are not current values, but changes in dynamics. A comprehensive consideration of the effects allows the existing criteria for decision-making to be expanded when implementing projects to develop the production system. It also allows the impact on both the enterprise and society to be assessed. The authors define both the quantitative and qualitative indicators for each group of effects. On the basis of the author's system of indicators, a methodology for comparative comparison of indicators using normalized indices was developed and the calculation of a generalized indicator substantiated. The proposed system of indicators was successfully tested at the Lytkarino Optical Glass Factory science-intensive enterprise when assessing a new domestic device for the development of the production system.

Conclusions. The results of the approved method for integrated assessment enabled the use of diverse indicators for the quantitative and qualitative assessment of the effects of the introduction of science-intensive projects. This included projects for import substitution of machinery and equipment. A combination of various effects will be relevant to any socioeconomic system, so the proposed integrated assessment method for evaluating the effects is universal to a certain extent. It can thus be adapted for scientific, technical and technological projects on import substitution of any industrial enterprise.

Keywords: effect, development, import substitution, project, system of indicators, integral index

• Submitted: 31.03.2023 • Revised: 15.05.2023 • Accepted: 04.09.2023

For citation: Abdulkadyrov M.A., Ignatov A.N., Kulikova N.N., Mityakov E.S. Assessment of the effects of production system development projects: Case study of Lytkarino Optical Glass Factory. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):76–88. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-76-88>

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 то, что внедрение новых технологических решений нацелено на их практическое применение для решения поставленных социально-экономических и политических задач [1], не всегда внедрение нововведений приносит ожидаемые последствия. Разумный анализ факторов и экономические расчеты позволяют обосновать различные эффекты или результаты, проявляющиеся от внедрения новой техники и оборудования. Для того, чтобы правильно обосновать необходимость технологических новшеств, наряду с экономическими факторами следует также учитывать неэкономические. Только комплексное рассмотрение всех факторов во взаимосвязи позволит составить реальную картину экономической целесообразности и технических возможностей применения в конкретных условиях новой техники или оборудования, требующих, как правило, больших капитальных вложений.

На современном этапе развития отечественной промышленности особую актуальность приобретает решение задач по замене импортных компонентов и оборудования [2–5]. Правовое регулирование промышленной политики основано в Государственной программе «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» (утв. Постановлением Правительства РФ от 15.04.2014 г. № 328)¹ и Федеральном законе «О промышленной политике в Российской Федерации» (от 31.12.2014 г. № 488-ФЗ)². При этом указанные документы предусматривают не просто замещение импортных компонентов и оборудования отечественными на внутреннем рынке, а повышение качества этих компонентов и оборудования для увеличения конкурентоспособности на внешних рынках.

¹ Государственная программа «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» (утв. Постановлением Правительства РФ от 15.04.2014 г. № 328). [State Program “Industry Development and Competitiveness Enhancement” (approved by Decree of the Government of the Russian Federation No. 328 dated April 15, 2014).]. <http://government.ru/docs/all/91634/>. Дата обращения 31.03.2023. / Accessed March 31, 2023 (in Russ.).

² Федеральный закон «О промышленной политике в Российской Федерации» от 31.12.2014 № 488-ФЗ (последняя редакция). [Federal Law “On Industrial Policy in the Russian Federation” No. 488-FZ dated December 31, 2014 (latest version).]. <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001201412310017>. Дата обращения 31.03.2023. / Accessed March 31, 2023 (in Russ.).

Необходимо отметить, что в современных реалиях подход к импортозамещению существенно менялся. Начиная с весны 2022 г. был принят внушительный перечень новых законопроектов и ряд поправок к существующим нормативно-правовым документам, которые нацелены на стимулирование отечественного рынка. К ним можно отнести:

1. Постановление Правительства РФ от 28.12.2022 г. № 2461 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 16.11.2015 г. № 1236 и признании утратившими силу отдельных положений некоторых актов Правительства Российской Федерации»³;
2. Новую редакцию Постановления Правительства РФ от 03.12.2020 г. № 2014 (ред. от 28.02.2023 г.) «О минимальной обязательной доле закупок российских товаров и ее достижении заказчиком»⁴;
3. Изменения к Постановлению Правительства РФ от 03.12.2020 г. № 2014 «О минимальной обязательной доле закупок российских товаров и ее достижении заказчиком»⁵;

³ Постановление Правительства РФ от 28.12.2022 г. № 2461 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 16.11.2015 г. № 1236 и признании утратившими силу отдельных положений некоторых актов Правительства Российской Федерации». [Decree of the Government of the Russian Federation dated December 28, 2022 No. 2461 “On Amending Decree of the Government of the Russian Federation No. 1236 dated November 16, 2015 and Annuling Certain Provisions of Certain Acts of the Government of the Russian Federation.”]. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202212300083>. Дата обращения 31.03.2023. / Accessed March 31, 2023 (in Russ.).

⁴ Постановление Правительства РФ от 03.12.2020 г. № 2014 «О минимальной обязательной доле закупок российских товаров и ее достижении заказчиком» (с изменениями на 28.02.2023 г.). [Decree of the Government of the Russian Federation No. 2014 dated December 03, 2020 “On the minimum mandatory share of purchases of Russian goods and its achievement by the customer” (as amended as of February 28, 2023).]. <https://docs.cntd.ru/document/573031324>. Дата обращения 31.03.2023. / Accessed March 31, 2023 (in Russ.).

⁵ Постановление Правительства РФ от 03.12.2020 г. № 2014 «О минимальной обязательной доле закупок российских товаров и ее достижении заказчиком» (с изменениями и дополнениями). [Decree of the Government of the Russian Federation No. 2014 dated December 3, 2020 “On the minimum mandatory share of purchases of Russian goods and its achievement by the customer” (as amended and supplemented).]. <https://base.garant.ru/75016819/>. Дата обращения 31.03.2023. / Accessed March 31, 2023 (in Russ.).

4. Постановление Правительства РФ от 31.03.2022 г. № 522 «О внесении изменений в Правила предоставления субсидии из федерального бюджета автономной некоммерческой организации «Агентство по технологическому развитию» на поддержку проектов, предусматривающих разработку конструкторской документации на комплектующие изделия, необходимые для отраслей промышленности»⁶ и др.

В представленных нормативно-правовых документах обозначена необходимость выпуска отечественной продукции, что особенно актуально для отраслей с высокой долей импорта (машиностроение, медицина и др.).

В сложившейся геополитической ситуации для уникального российского промышленного предприятия АО «Лыткаринский завод оптического стекла» (АО ЛЗОС) особую актуальность приобретают вопросы импортозамещения компонентов и оборудования.

В настоящее время АО ЛЗОС производит оптическое стекло и стекловолокно, крупногабаритные астрономические и космические зеркала, космические объективы, различные оптические детали и приборы. Предприятие располагает собственным научно-техническим центром, который на постоянной основе ведет разработку новых видов продукции и соответствующих технологий. В настоящее время развитие предприятия осуществляется на основе проектов модернизации и технического перевооружения стекловаренного и оптико-механического производства.

В рамках задачи отказа от закупки импортных компонентов, запчастей, оборудования и услуг с 2014 г. в АО ЛЗОС были реализованы проекты:

1. Техническое перевооружение с созданием центра компетенции отработки технологии производства специальных стекол и оптических деталей;
2. Опытно-конструкторская работа (ОКР) «Отработка технологии и изготовление прецизионных матриц из астроситалла СО-115М для панелей главного зеркала обсерватории «Миллиметр»;

⁶ Постановление Правительства РФ от 31.03.2022 г. № 522 «О внесении изменений в Правила предоставления субсидии из федерального бюджета автономной некоммерческой организации «Агентство по технологическому развитию» на поддержку проектов, предусматривающих разработку конструкторской документации на комплектующие изделия, необходимые для отраслей промышленности». [Decree of the Government of the Russian Federation No. 522 dated March 31, 2022 "Concerning the Introduction of Amendments to the Rules for Granting Subsidies from the Federal Budget to the Autonomous Non-Profit Organization "Agency for Technological Development" for the Support of Projects Involving the Development of Design Documentation for Component Products Necessary for Industries."]. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202204040037>. Дата обращения 31.03.2023. / Accessed March 31, 2023 (in Russ.).

3. ОКР «Разработка автоматизированных технологий изготовления заготовок из оптического бесцветного и цветного стекла методами горячей и холодной обработки»;

4. ОКР «Разработка технологии автоматизации оптического стекловаренного производства»;

5. ОКР «Разработка и изготовление комплекта зеркал объектива оптической станции «Зоркий».

Активное внедрение собственных разработок, а также приобретение и внедрение оборудования отечественных производителей позволили АО ЛЗОС расширить номенклатуру продукции и освоить выпуск новой. При этом ставились следующие задачи: разработка и производство конкурентоспособной продукции, обладающей более высоким потенциалом для роста собственного производства; эффективное использование ограниченных ресурсов; удешевление производства при оптимальном качестве продукции.

МЕТОДЫ

На примере ОКР «Разработка и изготовление комплекта зеркал объектива оптической станции «Зоркий», которая была реализована на АО ЛЗОС, проведем обоснование возможных эффектов, проявляющихся от внедрения интерферометра КП-119 (разработчик – АО ЛЗОС, Россия) для контроля внеосевых асферических поверхностей.

Выделим основные результаты (эффекты), проявляющиеся от инкорпорирования прибора КП-119 в производственную деятельность, которые можно разделить на внутренние и внешние (рис. 1). Такое разветвление обусловлено тем, что измерение признаков явлений, связанных с экономическими отношениями, одновременно составляет предмет исследования экономических наук и представляет собой объект измерений метрологии [6].

Внутренние эффекты связаны с функционированием завода и направлены на повышение его потенциала. Их целесообразно разделить по следующим направлениям: развитие потенциала завода и социально-экономические эффекты.

В свою очередь, эффекты развития потенциала завода можно подразделить на два вида: технологические и научные эффекты. Технологические эффекты обусловлены условиями, которые предполагают наличие у новой техники или оборудования лучших характеристик по сравнению с существующими средствами производства (ресурсосбережения, в т.ч. энергосбережения, производительности и надежности). Научные эффекты заключаются в накоплении новых знаний и обусловлены масштабом новизны внедряемого прибора, патентоспособностью и перспективностью идеи.

Ускорение производственного цикла, сокращение издержек производства и увеличение инвестиций,



Рис. 1. Эффекты, проявляющиеся от внедрения интерферометра КП-119

несомненно, приведут к увеличению финансово-экономических показателей деятельности предприятия, к экономическим эффектам. Увеличивающаяся стоимость нематериальных активов будет свидетельствовать не только об инновационности, но также обеспечивать экономическую безопасность и технологический суверенитет организации. В свою очередь, социальный эффект от внедрения новой техники будет проявляться в улучшении условий труда работников и экономических условий.

Внутренние эффекты развития потенциала предприятия и социально-экономические эффекты – разноплановые, но при этом взаимосвязаны.

Внешние эффекты проявляются положительными выгодами для третьих лиц, не вовлеченных в процесс внедрения и эксплуатации новой техники и оборудования, а также общества в целом. Общественный эффект от инкорпорирования прибора КП-119 в производственную деятельность проявляется в воздействиях на характер общественного процесса, на повышение уровня потенциала смежных отраслей, а также в создании предпосылок для вторичных инноваций. Эффект импортонезависимости проявляется в укреплении национальной безопасности и национальных интересов: локализации производства техники и оборудования на территории РФ; снижении доли импортных комплектующих и материалов при производстве собственной продукции. Экологический эффект связан с улучшением состояния окружающей среды, например, сбережением использования природных ресурсов, уменьшением негативного влияния на окружающую среду.

Внешние эффекты характеризуются взаимосвязанностью и направлены на долгосрочную перспективу, в т.ч. в смежных отраслях.

Состав показателей различных эффектов может варьироваться с учетом особенностей внедряемой техники и оборудования. Для оценки эффектов от внедрения интерферометра КП-119 для контроля внеосевых асферических поверхностей должна быть разработана оригинальная система показателей,

которая включает количественные и качественные показатели. Количественные показатели характеризуют измеримые результаты и используются для количественной оценки. Качественные показатели позволяют провести оценку качественных параметров на основе экспертных методов.

Выбор показателей осуществлялся с использованием научно-обоснованных принципов, раскрытых в работах Р. Каплана и Д. Нортон [7–9]: обзорность, древовидная структура системы и достоверность информации. Следуя названным принципам, систему показателей целесообразно подразделить на проекции, характеризующие разнообразные аспекты развития объекта исследования. Количество показателей в системе не должно превышать 30–35, а их число в одной проекции должно составлять 3–7. При этом индикаторами эффектов являются не текущие значения показателей, а их изменения (исследуются значения показателей до и после внедрения интерферометра).

Анализ эффектов от введения прибора КП-119 проводился на основе компаративного сопоставления показателей до и после его внедрения. В качестве подхода к сравнительному анализу ключевых показателей для измерения эффекта от внедрения прибора КП-119 был выбран подход, базирующийся на использовании нормированных индексов – относительных показателей, отражающих изменения значений индикаторов до и после инкорпорирования прибора КП-119 в производственную деятельность предприятия. Выбор такого подхода обусловлен следующими соображениями. Во-первых, задействование индексов позволяет оценить изменение сложных явлений в динамике. Во-вторых, с использованием индексов можно проводить различные виды компаративного анализа (временной, пространственной, сравнение с эталоном, прогнозом и т.п.). В-третьих, использование относительных величин позволяет анализировать показатели в одних осях на одном графике (например, с использованием столбиковых гистограмм или лепестковых диаграмм) и дает возможность расчета интегральных индексов для исследования обобщенных

эффектов или синтезированных показателей состояния системы. Таким образом, в работе предлагается задействовать нормирование исходных показателей системы на единую безразмерную шкалу.

В случае исследования эффектов от внедрения прибора КП-119 показатели, характеризующие эти эффекты, можно традиционно подразделить на «положительные» и «отрицательные». При этом с целью роста эффектов проекта «положительные» индикаторы целесообразно максимизировать, а «отрицательные» – минимизировать.

Для перевода исходных данных в безразмерные индексы будем использовать следующее формализованное выражение [10]:

$$y_{ij} = \begin{cases} \frac{K_{ij0}}{K_{ij1}} & \text{для «положительного» показателя,} \\ \frac{K_{ij1}}{K_{ij0}} & \text{для «отрицательного» показателя,} \end{cases} \quad (1)$$

где i – номер проекции системы показателей; j – индекс показателя внутри проекции; K_{ij0} и K_{ij1} – значение j -го показателя эффекта i -й проекции до и после внедрения прибора КП-119. После расчета нормированного индекса все показатели становятся «положительными» и изменяются в пределах отрезка $[0; 1]$.

Таким образом, значение нормированного индикатора y_{ij} интерпретируется следующим образом. Если $y_{ij} = 0.5$ ($K_{ij0} = K_{ij1}$), то рост по данному показателю отсутствует. Если $y_{ij} > 0.5$, то можно зафиксировать рост по данному показателю. Наконец, если $y_{ij} < 0.5$, то произошло снижение значения показателя.

После проведения процедуры вычисления нормированных индексов можно произвести расчет интегрального показателя оценки эффектов от внедрения прибора КП-119. Использование обобщенных индикаторов предоставляет возможность исследования ключевых агрегированных тенденций как в отдельных проекциях проекта, так и по всему набору исследуемых характеристик. При этом можно использовать разнообразные подходы к расчету обобщенной характеристики и выбору весовых коэффициентов при осуществлении свертки [11–13]. В данном исследовании был использован подход, основанный на вычислении интегрального показателя как суммы нормированных индексов с учетом их весовых коэффициентов по формуле:

$$\left\{ \begin{aligned} \Omega &= \sum_{i=1}^n \left(\sum_j^{m_i} y_{ij} w_j \right) w_i, \\ \sum_{j=1}^{m_i} w_j &= \sum_{i=1}^n w_i = 1, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где n – количество проекций в системе показателей; m_i – количество индикаторов в i -й проекции; w_j – весовой коэффициент значимости индикатора в системе; w_i – весовой коэффициент значимости проекции. Интегральный показатель, как и нормированные индексы, может изменяться от 0 до 1. В качестве порогового (критериального) значения для интегрального показателя, отделяющего положительный эффект от отрицательного, также принято значение 0.5. Это обосновывается тем, что при $\Omega < 0.5$ наблюдается в целом отрицательная динамика индикаторов, а при $\Omega > 0.5$ – положительная.

В истоках представленного в статье инструментария оценки эффектов заложены известные и успешно применяемые в теории и практике принципы анализа, синтеза, декомпозиции и объединения [14]. Использование нормированных индексов и обобщенных показателей позволяет делать выводы как об отдельных эффектах в развитии системы, так и об интегральном эффекте от внедрения проекта в целом.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно описанной методике выделения показателей всю систему индикаторов для оценки эффектов от внедрения интерферометра КП-119 для контроля внеосевых асферических поверхностей можно разделить на две проекции, отражающие внутренние и внешние эффекты от инкорпорирования проекта в производственную деятельность предприятия. В свою очередь проекцию «Внутренние эффекты» можно разделить на подсистемы показателей, связанных с технологическими, научными и социально-экономическими эффектами. Далее по аналогии каждую подсистему можно детализировать показателями, характеризующими отдельные эффекты от внедрения прибора КП-119.

При расчете качественных показателей проводилось индивидуальное оценивание индикаторов с использованием отдельных экспертов, независимых друг от друга [15]. В состав экспертной группы вошли квалифицированные специалисты – представители АО ЛЗОС (руководители предприятия, сотрудники базовой кафедры «Оптические системы и технологии» РТУ МИРЭА, инженеры и менеджеры проекта). Экспертами получены статистические характеристики показателей по десятибалльной системе (0 – отсутствие эффекта, 10 – максимальный эффект от внедрения прибора КП-119). Далее вычислялись сумма баллов, выставленная экспертами, и средняя арифметическая балльная оценка показателей. Таким образом качественные показатели были переведены в количественные.

Состав системы показателей для оценки эффектов от внедрения прибора КП-119 с учетом специфики проекта и современных реалий, расчетные

формулы и экономическое содержание каждого показателя представлены в таблице. Отметим, что в данном случае научный интерес представляют не сами

показатели, а их комбинация, а также методика нахождения обобщенного индекса, определяющего интегральную оценку эффекта от внедрения проекта.

Таблица. Система показателей для оценки эффектов от внедрения интерферометра КП-119

Наименование показателя	Расчетная формула	Методические пояснения
Внутренние эффекты		
1. Технологический эффект		
1.1. Показатели ресурсосбережения		
1.1.1. Энергоемкость	$K_{111} = W/Q$, W – суммарный объем потребленных энергоносителей (электроэнергии, теплоэнергии, технологического топлива и др.) для производства продукции; Q – количество продукции, произведенной за расчетный период	Показывает затраты энергии (энергоресурсов и энергоносителей) на производство единицы продукции
1.1.2. Ресурсоемкость	$K_{112} = TC/Q$, TC – совокупные производственные затраты	Показывает затраты ресурсов (в денежном выражении) на производство единицы продукции
1.1.3. Время выполнения операций производственными рабочими при производстве единицы продукции	$K_{113} = \sum_{i=1}^n t_i / n$, t_i – время i -й операции, устанавливается по данным хронометражных наблюдений; n – общее количество операций	Показывает затраты времени при выполнении отдельных процессов производства при производстве единицы продукции
1.1.4. Выход годной продукции	$K_{114} = QG/SR$, QG – количество годной продукции, произведенной за расчетный период; SR – объем фактически израсходованного сырья	Показывает, насколько эффективно расходуется сырье, а также характеризует технический и организационный уровень технического процесса
1.2. Показатели производительности		
1.2.1. Производительность оборудования	$K_{121} = Q/T$, Q – объем произведенной продукции; T – общее время работы оборудования	Отражает объем продукции (работы), производимой в единицу времени
1.2.2. Производительность труда	$K_{122} = QS/R$, QS – объем произведенной продукции в финансовом (стоимостном) выражении; R – количество рабочих, вырабатывающих продукцию	Показывает, насколько эффективно рабочий (или группа рабочих) вложил свой труд в создание единицы продукции
1.2.3. Коэффициент использования ресурсов	$K_{123} = FQ/TC$, FQ – фактический объем ресурсов; TC – общая емкость (максимальное количество используемых ресурсов)	Показывает степень (интенсивность) использования ресурсов
1.3. Показатели надежности		
1.3.1. Нарботка на отказ (безотказность)	$K_{131} = \sum_{i=1}^m t_i / m$, t_i – интервалы времени безотказной работы оборудования; m – число отказов оборудования, возникших за рассматриваемый календарный период	Является статистической мерой и используется для прогнозирования поведения, как вероятность безотказной работы оборудования за заданное время

Таблица. Продолжение

Наименование показателя	Расчетная формула	Методические пояснения
1.3.2. Технический ресурс (долговечность)	$K_{132} = T_{\text{ресурс}}$ $T_{\text{ресурс}}$ – технический ресурс оборудования (запас)	Характеризует запас возможной наработки оборудования (время) от начала его эксплуатации или возобновления эксплуатации после ремонта до наступления предельного состояния или капитального ремонта для обеспечения его работоспособности в течение определенного промежутка времени
1.3.3. Среднее время восстановления (ремонтотпригодность)	$K_{133} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$ n – число восстановлений; t_i – время, затраченное на восстановление (обнаружение, поиск причины и устранение отказа)	Характеризует математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа
1.3.4. Цена надежности	$K_{134} = Z_{\text{пр}} \cdot \left(\frac{NA}{NA_0} \right)^{\alpha}$ $Z_{\text{пр}}$ – цена надежности прототипа (аналога); NA и NA_0 – наработка на отказ или средний срок службы оборудования и прототипа; α – эмпирический показатель, характеризующий уровень производства, обычно $\alpha \approx 0.5-1.5$	Показывает, во сколько раз затраты завода из-за ненадежности оборудования превышают стоимость продукции или какую часть стоимости продукции составляют затраты при эксплуатации, обусловленные ненадежностью
2. Научный эффект		
2.1. Перспективность дальнейшего развития	$K_{21} = \sum_{i=1}^N K_{21i} / N$ K_{21i} – балльная оценка (от 1 до 10) i -го эксперта; N – количество экспертов, участвовавших в опросе	Показывает перспективность заложенной в основу идеи для дальнейшего развития на заводе. Вычисляется согласно экспертным оценкам
2.2. Новизна	$K_{22} = \sum_{i=1}^N K_{22i} / N$ K_{22i} – балльная оценка (от 1 до 10) i -го эксперта; N – количество экспертов, участвовавших в опросе	Показывает уровень и масштаб новизны установки, ее составных частей; а также превосходство перед аналогами. Вычисляется согласно экспертным оценкам
2.3. Патентоспособность	$K_{23} = \sum_{i=1}^N K_{23i} / N$ K_{23i} – балльная оценка (от 1 до 10) i -го эксперта; N – количество экспертов, участвовавших в опросе	Показывает охраноспособность и перспективность патентования. Вычисляется согласно экспертным оценкам
3. Экономический эффект		
3.1. Производственная себестоимость	$K_{31} = \sum_{i=1}^n Z_i$ n – число статей затрат; Z_i – сумма конкретной затраты	Формируется с учетом затрат, связанных с производством и выпуском единицы продукции
3.2. Балансовая стоимость оборудования	$K_{32} = S - A - Ob$ S – стоимость оборудования по балансу, включая расходы на приобретение, доставку, установку, стоимость новых узлов; A – амортизация; Ob – обесценивание	Показывает стоимость оборудования по балансу. После модернизации балансовая стоимость оборудования пересчитывается

Таблица. Продолжение

Наименование показателя	Расчетная формула	Методические пояснения
3.3. Стоимость нематериальных активов	$K_{33} = NA,$ NA – стоимость нематериальных активов по балансу	Показывает стоимость объектов, не имеющих вещественной, физической формы, предназначенных для использования в процессе производства
4. Социальный эффект		
4.1. Число реконструируемых/создаваемых рабочих мест	$K_{41} = Rm,$ Rm – количество рабочих мест, реконструируемых/создаваемых в результате внедрения оборудования	Показывает количество реконструированных/создаваемых рабочих мест, где используется новое/модернизированное оборудование
4.2. Индекс уровня заработной платы на реконструируемых/создаваемых рабочих местах	$K_{42} = a/a_{cp},$ a – средний уровень заработной платы на реконструируемых/создаваемых рабочих местах; a_{cp} – средний уровень заработной платы в регионе	Показывает отношение среднего уровня заработной платы на реконструируемых/создаваемых рабочих местах к среднему уровню заработной платы в регионе
4.3. Удовлетворенность работников условиями труда	$K_{43} = \sum_{i=1}^N K_{43i} / N,$ K_{43i} – балльная оценка (от 1 до 10) i -го эксперта; N – количество экспертов, участвовавших в опросе	Показывает удовлетворенность условиями труда работников. Вычисляется согласно экспертным оценкам
4.4. Развитие/оптимизация производственных и организационных процессов	$K_{44} = \sum_{i=1}^N K_{44i} / N,$ K_{44i} – балльная оценка (от 1 до 10) i -го эксперта; N – количество экспертов, участвовавших в опросе	Показывает, насколько эффективно функционируют производственные и организационные процессы при эксплуатации оборудования. Вычисляется согласно экспертным оценкам
Внешние эффекты		
5. Общественный эффект		
5.1. Потенциал для развития смежных отраслей	$K_{51} = \sum_{i=1}^N K_{51i} / N,$ K_{51i} – балльная оценка (от 1 до 10) i -го эксперта; N – количество экспертов, участвовавших в опросе	Показывает перспективность развития смежных отраслей в результате развития идеи, новизны установки, ее составных частей. Вычисляется согласно экспертным оценкам
5.2. Предпосылки для вторичных инноваций	$K_{52} = \sum_{i=1}^N K_{52i} / N,$ K_{52i} – балльная оценка (от 1 до 10) i -го эксперта; N – количество экспертов, участвовавших в опросе	Показывает перспективность дальнейшего развития идеи/оборудования, его составных частей. Вычисляется согласно экспертным оценкам
6. Эффект импортонезависимости		
6.1. Уровень импортозависимости	$K_{61} = \frac{Q_{замещ}}{Q_{общ}},$ $Q_{замещ}$ – объем поступивших по импорту продукции/оборудования/технологий; $Q_{общ}$ – общий текущий объем потребления или использования продукции/оборудования/технологий в процессе функционирования предприятия	Отражает долю импортных продукции/оборудования/технологий в общем объеме продукции/оборудования/технологий

Таблица. Окончание

Наименование показателя	Расчетная формула	Методические пояснения
6.2. Коэффициент локализации производства	$K_{62} = (U_{\text{отп}} - U_{\text{им}}) / U_{\text{отп}}$ $U_{\text{отп}} - \text{отпускная цена продукции};$ $U_{\text{им}} - \text{цена комплектующих, компонентов и материалов, поступающих по импорту}$	Показывает отношение разности отпускной цены продукции и цены комплектующих, компонентов и материалов, поступающих по импорту, к отпускной цене конечной продукции
7. Экологический эффект		
7.1. Индекс внедрения экологических инноваций	K_{71} находится из формы 4-инновация (раздел 16) ¹ и определяется как сумма кода «1» в строках 1101–1110, деленная на 10	Индекс меняется от 0 до 1 (0 – нет экологических инноваций, 1 – максимальный уровень их эффективности)
7.2. Индекс соответствия природоохранному законодательству	K_{72} находится из формы 4-инновация (раздел 16) ² и определяется как сумма кода «1» в строках 1111–1117, деленная на 7	Индекс меняется от 0 до 1 (0 – нет соответствия экологическим нормам, 1 – максимальный уровень соответствия)

Источник: разработано авторами.

¹ Приказ Федеральной службы государственной статистики от 29.07.2022 г. № 538 «Об утверждении форм федерального статистического наблюдения для организации федерального статистического наблюдения за деятельностью в сфере образования, науки, инноваций и информационных технологий». Форма № 4-инновация «Сведения об инновационной деятельности организации». [Order of the Federal State Statistics Service No. 538 dated July 29, 2022 “On Approval of Federal Statistical Observation Forms for Organization of Federal Statistical Observation of Activities in the Sphere of Education, Science, Innovation and Information Technology.” Form No. 4-innovation “Information on innovation activity of the organization.”]. <https://docs.cntd.ru/document/351745217>. Дата обращения 31.03.2023. / Accessed March 31, 2023 (in Russ.).

² Там же. [Ibidem.].

На рис. 2 показаны значения нормированных индексов оценки эффектов от внедрения прибора КП-119, полученные по формуле (1) путем компаративного сопоставления данных по индикаторам, представленным в таблице до и после внедрения прибора. Расчетный период индикаторов составил один год. Ценовые показатели рассчитывались с учетом ставки дисконтирования.

В последней строке рисунка представлен результат вычисления обобщенного показателя эффекта от внедрения интерферометра КП-119. Весовые коэффициенты при расчетах интегрального показателя выбирались экспертно.

Анализ значений нормированных индексов позволяет сделать следующие выводы:

1. Значения большинства индексов превысило величину $y = 0.5$, что говорит о положительных эффектах от внедрения интерферометра КП-119 для контроля внеосевых асферических поверхностей.
2. Некоторые индексы оказались ниже референсного уровня $y = 0.5$. К ним относятся индексы ресурсоемкости, внедрения экологических инноваций и производственной себестоимости.
3. Значение обобщенного индекса, рассчитанного по формуле (2), оказалось равно $\Omega = 0.57$, что свидетельствует о положительном интегральном эффекте, полученном от внедрения интерферометра.

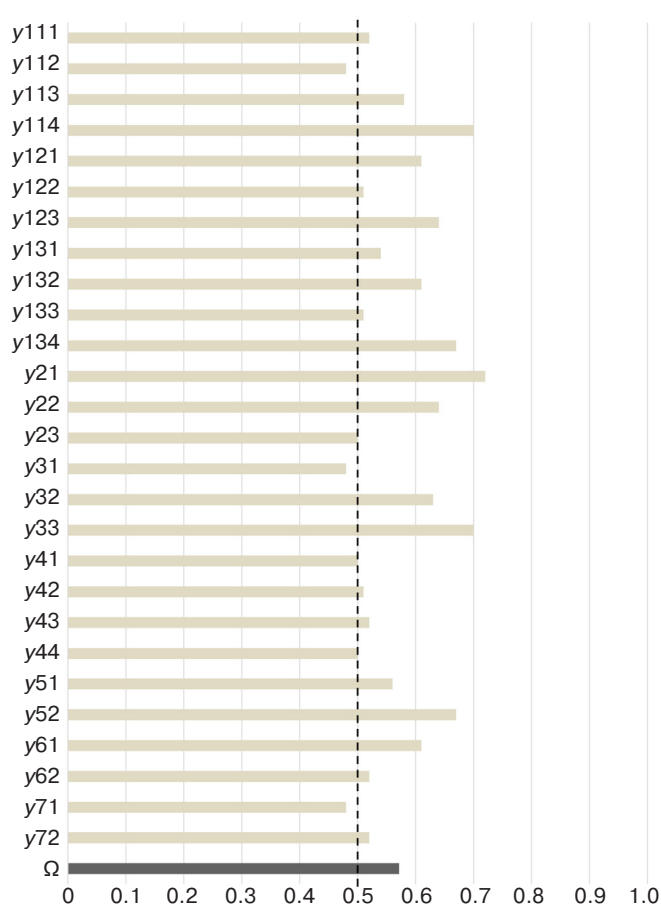


Рис. 2. Нормированные индексы оценки эффектов от внедрения интерферометра КП-119

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена авторская методика интегральной оценки эффектов от реализации проекта развития производственной системы. С целью получения синтетической оценки разработана система показателей для комплексного исследования эффектов, полученных от проекта внедрения нового прибора в рамках реализации политики импортозамещения. Разработанная система показателей отличается обоснованием разнообразных эффектов, проявляющихся от внедрения техники и оборудования (внутренние и внешние эффекты различной природы: эффект развития потенциала, социально-экономический, эффект импортнезависимости, общественный, экологический), а также предполагает компаративное сопоставление количественных значений показателей, рассчитанных до и после инкорпорирования проекта в производственную систему.

Апробация результатов производилась на примере ОКР «Разработка и изготовление комплекта зеркал объектива оптической станции «Зоркий», которая была реализована на АО «Лыткаринский завод оптического стекла», заключалась во внедрении интерферометра КП-119 для контроля внеосевых асферических поверхностей, и показала положительный интегральный эффект.

Предложенная методика интегральной оценки эффектов от внедрения нового прибора является в определенной мере универсальной и может быть адаптирована для научно-технических и технологических проектов любого промышленного предприятия. Вместе с тем, для того чтобы оценить целесообразность реализации проекта по импортозамещению,

необходимо проанализировать рациональность встраивания нового прибора в производственно-технологическую цепочку создания добавленной стоимости. В связи с этим, дальнейшее развитие разработанной системы показателей должно быть связано с добавлением показателей, которые позволят оценить влияние проекта на развитие производственной системы в целом, снижение зависимости от импорта оборудования, качество производимой продукции, общие затраты и стоимость производимой продукции. Эти показатели позволяют обобщить оценку эффектов, полученных от проекта по импортозамещению.

Вклад авторов

М.А. Абдулкадыров – представление данных для проведения расчетов, научное редактирование.

А.Н. Игнатов – представление данных для проведения расчетов, научное редактирование.

Н.Н. Куликова – идея исследования, анализ литературы, разработка системы показателей, написание и редактирование текста статьи.

Е.С. Митяков – анализ литературы, разработка методики расчетов, проведение исследования, подготовка графических материалов, написание и редактирование текста статьи.

Authors' contributions

M.A. Abdulkadyrov – presentation of data for calculations, scientific editing.

A.N. Ignatov – presentation of data for calculations, scientific editing.

N.N. Kulikova – the idea of the study, literature analysis, development of a system of indicators, writing and editing the text of the article.

E.S. Mityakov – literature analysis, development of calculation methods, research, preparation of graphic materials, writing and editing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макарова Е.В. Экономическая эффективность внедрения инновационного технологического оборудования: факторы, риски, управленческие решения. *Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки*. 2013;9(125):70–76.
2. Герасименко О.А., Авилова Ж.Н., Гукова Е.А. Импортозамещение в промышленности: комплексный подход с позиции государственно-частного партнерства. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2016;1(1):209–213.
3. Архипов С.О., Караев А.Э. Импортозамещение – «окно возможностей» для российской промышленности. *Управление качеством в нефтегазовом комплексе*. 2015;4:30–31.

REFERENCES

1. Makarova E.V. Economic efficiency of innovation technological equipment introduction: factors, risks, management solutions. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Gumanitarnye nauki = Tambov University Review. Series: Humanities*. 2013;9(125):70–76 (in Russ.).
2. Gerasimenko O.A., Avilova Zh.N., Gukova E.A. Import substitution in industry: A comprehensive approach public-private partnership. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova = V.G. Shukhov Bulletin of Belgorod State Technological University*. 2016;1(1):209–213 (in Russ.).
3. Arkhipov S.O., Karaev A.E. Import substitution is a “window of opportunity” for Russian industry. *Upravlenie kachestvom v neftegazovom komplekse = Quality Management in Oil and Gas Industry*. 2015;4:30–31 (in Russ.).

4. Гнидченко А.А. Импортзамещение в российской промышленности: текущая ситуация и перспективы. *Журнал Новой экономической ассоциации*. 2016;4(32):154–161. URL: <http://journal.econorus.org/pdf/NEA-32.pdf>
5. Безпалов В.В. Импортзамещение: анализ подходов к определению понятия. *Управление экономическими системами: электронный научный журнал*. 2016;11(93):9.
6. Усов Л.С., Селименков Р.Ю., Зарубина А.И., Яковлева Е.Н. *Научные основы экономической метрологии*. Вологда: Негосударственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Вологодский институт бизнеса; 2015. 516 с. ISBN 978-5-9039-4854-3
7. Каплан Р.С., Нортон Д.П. *Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию*. М.: ЗАО «Олимп-Бизнес»; 2019. 320 с. ISBN 978-5-9693-0358-4
8. Kaplan R.S., Norton D.P. *Strategy Maps: Converting Intangible Assets into Tangible Outcomes*. Boston, Massachusetts, USA: Harvard Business Press; 2004. 324 p.
9. Kaplan R.S., Norton D.P. The Balanced Scorecard – Measures that Drive Performance. *Harv. Bus. Rev.* 1992;70(1):71–79. URL: <https://hbr.org/1992/01/the-balanced-scorecard-measures-that-drive-performance-2>
10. Сенчагов В.К., Митяков С.Н. Использование индексного метода для оценки уровня экономической безопасности. *Вестник Академии экономической безопасности МВД России*. 2011;5:41–50.
11. Митяков Е.С., Корнилов Д.А. К вопросу о выборе весов при нахождении интегральных показателей экономической динамики. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. 2011;3(90):289–299.
12. Митяков Е.С., Митяков С.Н. Адаптивный подход к вычислению обобщенного индекса экономической безопасности. *Современные проблемы науки и образования*. 2014;2:415. URL: <https://science-education.ru/article/view?id=12435>
13. Lapshin V., Sohatskaya S. Choosing the weighting coefficients for estimating the term structure from sovereign bonds. *Int. Rev. Econ. & Fin.* 2020;70(issue C): 635–648. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2020.08.011>
14. Баринов В.А., Болотова Л.С., Волкова В.Н. и др. *Теория систем и системный анализ в управлении организациями: справочник*; под. ред. В.Н. Волковой, А.А. Емельянова. М.: Финансы и статистика; 2021. 847 с.
15. Родионов Н.В., Загидуллин Н.В. Анализ экспертных методов оценки качества инноваций. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2020;10:105–111.
4. Gnidchenko A.A. Import substitution in the Russian industry: current situation and prospects. *Zhurnal Novoi ekonomicheskoi assotsiatsii = Journal of the New Economic Association*. 2016;4(32):154–161 (in Russ.). Available from URL: <http://journal.econorus.org/pdf/NEA-32.pdf>
5. Bezpalov V.V. Import substitution: analysis of approaches to the definition of the concept. *Upravlenie ekonomicheskimi sistemami: elektronnyi nauchnyi zhurnal = Management of Economic Systems: electronic scientific journal*. 2016;11(93):9 (in Russ.).
6. Usov L.S., Selimenkov R.Yu., Zarubina A.I., Yakovleva E.N. *Nauchnye osnovy ekonomicheskoi metrologii (Scientific Foundations of Economic Metrology)*. Vologda: Non-governmental (private) educational institution of higher profession education Vologda Business Institute; 2015. 516 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9039-4854-3
7. Kaplan R.S., Norton D.P. *Sbalansirovannaya sistema pokazatelei. Ot strategii k deistviyu (Balanced Scorecard. From Strategy to Action)*. Moscow: Olimp-Biznes; 2019. 320 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9693-0358-4
8. Kaplan R.S., Norton D.P. *Strategy Maps: Converting Intangible Assets into Tangible Outcomes*. Boston, Massachusetts, USA: Harvard Business Press; 2004. 324 p.
9. Kaplan R.S., Norton D.P. The Balanced Scorecard – Measures that Drive Performance. *Harv. Bus. Rev.* 1992;70(1):71–79. Available from URL: <https://hbr.org/1992/01/the-balanced-scorecard-measures-that-drive-performance-2>
10. Senchagov V.K., Mityakov S.N. Using the index method to assess the level of economic security. *Vestnik Akademii ekonomicheskoi bezopasnosti MVD Rossii = Vestnik of Academy of Economic Security of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2011;5:41–50 (in Russ.).
11. Mityakov E.S., Kornilov D.A. Regarding the issue of proper weighting coefficients in determination of integral indicators of economic dynamics. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva = R.E. Alekseev Transactions of NNSTU*. 2011;3(90):289–299 (in Russ.).
12. Mityakov E.S., Mityakov S.N. Adaptive approach to calculation of the generalized index of economic security. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2014;2:415 (in Russ.). Available from URL: <https://science-education.ru/article/view?id=12435>
13. Lapshin V., Sohatskaya S. Choosing the weighting coefficients for estimating the term structure from sovereign bonds. *Int. Rev. Econ. & Fin.* 2020;70(issue C): 635–648. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2020.08.011>
14. Barinov V.A., Bolotova L.S., Volkova V.N., et al. *Teoriya sistem i sistemnyi analiz v upravlenii organizatsiyami: spravochnik (Theory of systems and system analysis in management of organizations: a reference book)*. Volkova V.N., Emelyanov A.A. (Eds.). Moscow: Finansy i statistika; 2021; 847 p. (in Russ.).
15. Rodionov N.V., Zagidullin N.V. Analysis of expert methods innovation quality assessment. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula State University. Technical Science*. 2020;10:105–111 (in Russ.).

Об авторах

Абдулкадыров Магомед Абдуразакович, к.т.н., заведующий базовой кафедрой оптических систем и технологий при АО «Лыткаринский завод оптического стекла» Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); помощник главного инженера, АО «Лыткаринский завод оптического стекла» (140080, Россия, Московская область, Лыткарино, Парковая ул., д. 1). E-mail: lastro-am@lzos.ru. Scopus Author ID 6603205346, SPIN-код РИНЦ 5019-1811, <https://orcid.org/0009-0004-1152-5096>

Игнатов Александр Николаевич, к.т.н., генеральный директор, АО «Лыткаринский завод оптического стекла» (140080, Россия, Московская область, Лыткарино, Парковая ул., д. 1). E-mail: ignatov@lzos.ru. Scopus Author ID 7101837680, SPIN-код РИНЦ 9737-2091, <https://orcid.org/0000-0002-9627-4799>

Куликова Наталия Николаевна, к.э.н., доцент, заведующий кафедрой управления инновациями Института технологий управления ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kulikova@mirea.ru. Scopus Author ID 57190409353, SPIN-код РИНЦ 7442-9985, <https://orcid.org/0000-0003-3378-5230>

Митяков Евгений Сергеевич, д.э.н., профессор, профессор кафедры информатики Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: mityakov@mirea.ru. Scopus Author ID 55960540500, SPIN-код РИНЦ 5691-8947, <https://orcid.org/0000-0001-6579-0988>

About the authors

Magomed A. Abdulkadyrov, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Basic Department of Optical Systems and Technologies at Lytkarino Optical Glass Factory, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia); Assistant Chief Engineer, Lytkarino Optical Glass Factory (1, Parkovaya ul., Moscow oblast, Lytkarino, 140080 Russia). E-mail: lastro-am@lzos.ru. Scopus Author ID 6603205346, RSCI SPIN-code 5019-1811, <https://orcid.org/0009-0004-1152-5096>

Alexander N. Ignatov, Cand. Sci. (Eng.), General Director, Lytkarino Optical Glass Factory (1, Parkovaya ul., Moscow oblast, Lytkarino, 140080 Russia). E-mail: ignatov@lzos.ru. Scopus Author ID 7101837680, RSCI SPIN-code 9737-2091, <https://orcid.org/0000-0002-9627-4799>

Natalia N. Kulikova, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Head of the Department of Innovation Management, Institute of Management Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kulikova@mirea.ru. Scopus Author ID 57190409353, RSCI SPIN-code 7442-9985, <https://orcid.org/0000-0003-3378-5230>

Evgeniy S. Mityakov, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Department of Informatics, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: mityakov@mirea.ru. Scopus Author ID 55960540500, RSCI SPIN-code 5691-8947, <https://orcid.org/0000-0001-6579-0988>

Мировоззренческие основы технологии и общества
Philosophical foundations of technology and society

УДК 004.8
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-89-98>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Семантические особенности сложных техносоциальных систем: к вопросу о таксономии технологического пакета искусственного интеллекта

С.И. Довгучиц^{1, 2, @}

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт «Центр», Москва, 123242 Россия

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: redaktor@vniicentr.ru

Резюме

Цель. Целью работы является совершенствование научно-методологического аппарата наук об искусственном интеллекте (ИИ) за счет обогащения их понятийного аппарата. Применяемый в настоящее время понятийный аппарат наук об ИИ не отражает сложной специфики данного технологического и социально-экономического феномена, как обладающего комплексом возможностей и соответствующих им взаимосвязей, позволяющих имитировать когнитивные функции человека и получать сопоставимые с ними результаты. С этой целью автор статьи структурирует понятие технологического пакета ИИ, описывая его системные свойства, связи и функциональные элементы сообразно видам мыслительной и деятельностной активности человека.

Методы. Исследование основано на концепции (методе) технологических пакетов – генетически и функционально связанных совокупностей технологий, обладающих системными свойствами.

Результаты. Впервые в отечественной и зарубежной практике уточнена и структурирована базовая (общая) таксономия технологического пакета ИИ, а также предложена таксономия метатехнологического пакета (пакета метатехнологий) ИИ. Общая таксономия может служить в качестве инструмента совершенствования стратегий, методологических документов и государственных программ, определяющих развитие систем ИИ на государственном или отраслевом уровне.

Выводы. Предложенные базовая (общая) таксономия технологического пакета и таксономия пакета метатехнологий позволяют отойти от редуцированного представления об ИИ, повышают семантическую и методологическую ясность в отношении ИИ как сложного техносоциального феномена и способствуют гармонизации интеграции систем ИИ в сфере социально-экономической деятельности государства, могут стать основой для дальнейшего совершенствования государственного экономического и правового регулирования развития ИИ.

Ключевые слова: искусственный интеллект, информационно-коммуникационные технологии, технологические пакеты, техносоциальные системы, метатехнологические пакеты

• Поступила: 14.07.2023 • Доработана: 21.08.2023 • Принята к опубликованию: 22.09.2023

Для цитирования: Довгучиц С.И. Семантические особенности сложных техносоциальных систем: к вопросу о таксономии технологического пакета искусственного интеллекта. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):89–98. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-89-98>

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Semantic features of complex technosocial systems: On the taxonomy of artificial intelligence technological packages

Sergey I. Dovguchits ^{1, 2, @}

¹ VNIICenter, Moscow, 123242 Russia

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: redaktor@vniicentr.ru

Abstract

Objectives. The aim of this work is to enhance the scientific and methodological apparatus of artificial intelligence (AI) sciences by enriching their conceptual framework. The current conceptual framework of AI sciences does not reflect the intricate nature of this technological and socioeconomic phenomenon as possessing the diverse range of capabilities and the interconnectedness that allows for the imitation of human cognitive functions and comparable results. The author of the article structures the concept of the technological package of AI, describing its system properties, connections and functional elements based on the various types of human cognitive and operational activities.

Methods. The research is based on the concept (method) of technological packages—genetically and functionally connected sets of technologies with system properties.

Results. For the first time in Russian and international practice, the basic (general) taxonomy of the AI technological package has been specified and structured. A taxonomy of the AI metatechnological package (a package of metatechnologies) has been proposed. General taxonomy can serve as a tool for improving strategies, methodological documents and state programs to define the development of AI systems at state or industry level.

Conclusions. The suggested basic (general) taxonomy of technological package and taxonomy of metatechnologies package allows research to move away from the limited view of AI. It increases semantic and methodological clarity in relation to AI as a complex technosocial phenomenon and contributes to the harmonized integration of AI systems into the sphere of socioeconomic activities of the state. It can thus serve as a foundation for further improvement of state economic and legal regulation of AI development.

Keywords: artificial intelligence, information and communication technologies, technosocial systems, technological packages, meta-technological packages

• Submitted: 14.07.2023 • Revised: 21.08.2023 • Accepted: 22.09.2023

For citation: Dovguchits S.I. Semantic features of complex technosocial systems: On the taxonomy of artificial intelligence technological packages. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):89–98. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-89-98>

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

The author declares no conflicts of interest.

ГЛОССАРИЙ

Искусственный интеллект – свойство интеллектуальных технологических систем выполнять творческие функции, которые традиционно считались прерогативой человека.

Таксономия технологического пакета – систематизированное представление о ключевых функциональных элементах технологического пакета.

Технологическая независимость – комплекс мер, направленных на обеспечение, развитие и удержание внутри Российской Федерации кадрового, финансового, технологического и материального потенциала, направленного на развитие российской промышленности, в т.ч. посредством преимущественного использования российской промышленной продукции, материалов, сырья и технологий.

Технологический пакет – генетически и функционально связанная совокупность технологий, обладающая системными свойствами. Технологии, входящие в пакет, взаимозависимы, развиваются совместно и модифицируют друг друга в процессе развития.

Метатехнологический пакет – генетически и функционально связанная совокупность технологий, испытывающая на себе воздействия внешней среды, преобразующие ее от начального состояния к конечному.

ВВЕДЕНИЕ

Технологии искусственного интеллекта (ИИ) на современном этапе их развития приобретают все большее значение практически для всех областей человеческой деятельности. Не ограничиваясь только новыми продуктами и услугами, ИИ оказывает трансформирующее воздействие на сложившиеся системы экономических, трудовых, социальных и культурных отношений [1].

В частности, в экономике внедрение систем ИИ может способствовать повышению производительности труда, увеличению эффективности бизнес-процессов и сокращению издержек, что в свою очередь может привести к созданию новых рынков и возможностей для ускорения экономического роста. Однако внедрение ИИ может также существенно увеличить риски повышения турбулентности

на рабочем рынке за счет замены тех профессий, которые отнюдь не относятся к тяжелым и непопулярным и считаются достаточно престижными в обществе. Таким примером могут служить возможности нейросети «ChatGPT-4» в программировании, техническом писательстве, копирайтинге и анализе данных [2].

В социальной сфере внедрение ИИ может привести как к сглаживанию неравенства, предоставляя равные возможности для доступа к образованию, здравоохранению и другим важнейшим услугам, так и к его углублению [1]. В современных социально-экономических условиях технологии ИИ за счет их сложности и относительно малой распространенности являются дефицитным ресурсом, чья важность и востребованность будут только возрастать. Это обстоятельство способно привести к резкому усилению социального неравенства, причем не только в отношении доступа к технологиям и услугам с применением ИИ, но и в отношении других дифференцируемых ресурсов, таких как электроэнергия, интернет-связь и т.п.

Таким образом, ИИ как трансформирующая технология создает технологическое напряжение – рассогласованность технологических императивов и принятых в обществе социальных практик [3]. Поскольку эти практики являются глубоко укорененными, их форсированное изменение способно вызвать инновационное сопротивление в обществе [4]. Этот противоречивый аспект адаптации новых цифровых технологий свидетельствует о том, что развитие ИИ требует комплексного подхода, включающего анализ и прогнозирование возможных социальных, экономических и культурных последствий, рисков и угроз, а также разработку стратегий и государственных программ, направленных на обеспечение гармоничной интеграции систем ИИ в общество. В этой связи необходимо признать, что господствующее в настоящее время в социально-экономических науках и государственном правлении представление об ИИ характеризуется отсутствием целостности как на объяснительном (понятия, принципы и смысловые модели), так и на воздействующем (практики, методы, организационные и деятельностные модели) уровнях. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года определяет искусственный интеллект как комплекс технологических решений,

позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение и поиск решений без заранее заданного алгоритма) и получать при выполнении конкретных задач результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека¹. Тем не менее, в практической сфере ИИ зачастую понимается или фрагментарно, т.е. как набор невзаимосвязанных готовых к использованию «умных вещей» (инструментов) [5], или упрощенно – как универсальная и не имеющая побочных эффектов технологическая, экономическая и управленческая панацея [6]. Оба приведенных примера редукционного подхода к пониманию ИИ противоречат его природе как сложного многоаспектного феномена, постоянно расширяющего свое присутствие во все большем количестве сфер человеческой жизнедеятельности на индивидуальном и на общественном уровнях.

Редукционизм в отношении любого сложного научно-технического феномена существенно осложняет любые попытки точного прогнозирования и планирования его развития в интересах экономического роста и технологического прогресса и в конечном итоге не способствует гармоничной адаптации связанных с ним новшеств. Преодоление этого обстоятельства требует более эффективного методологического подхода, который руководствуется многоаспектностью ИИ как комплексного научно-технического, социально-экономического, правового феномена и не сводится к хорошо знакомым нам примерам его прикладного использования.

В этой связи в рамках данной статьи предлагается обратиться к концепции (методу) «технологического пакета» (ТП) и применить ее в отношении ИИ, предложив базовую (общую) таксономию ТП ИИ. Сформулированное в статье методологическое представление о ТП ИИ как о пакете технологий позволит выполнить следующие действия:

- структурировать системно значимые области интеграции ИИ с человеком на индивидуальном и на общественном уровнях;
- кратко обозначить состав актов и систем воздействий, которые ИИ оказывает на данные системно значимые области;
- способствовать гармонизации представления об ИИ как о сложном многоаспектном, но целостном феномене в методологическом и правовом пространствах.

¹ Указ Президента Российской Федерации от 10.10.2019 г. № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации». [Decree of the President of the Russian Federation dated October 10, 2019, No. 490 “On the development of artificial intelligence in the Russian Federation.” (in Russ.).] <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/AN4x6HgKWANwVtMOFPDhcbRpvd1HCCsv.pdf>. Дата обращения 23.05.2023. / Accessed May 23, 2023.

Ранее в отечественной и зарубежной практике подход к рассмотрению ИИ как ТП не применялся, что породило упомянутое ранее редуцированное представление об ИИ, мешающее установлению семантической ясности в отношении этого феномена. Новизна данной статьи обусловлена предпринятой в ней первой в отечественной и зарубежной практике попыткой структурировать понятие ТП ИИ, описав его системные свойства, связи, функциональные элементы как комплекса технологических решений, позволяющего имитировать когнитивные функции человека.

МЕТОДЫ

В отечественной научной литературе под ТП понимается генетически и функционально взаимосвязанная совокупность технологий и научно-технических решений, обладающая системными свойствами [7]. Технологии, входящие в пакет, взаимозависимы, развиваются совместно и модифицируют друг друга в процессе развития. При этом утверждается, что ТП, как правило, реализует одну из социально-значимых потребностей [8]. В отношении ИИ данную потребность можно охарактеризовать как делегирование творческих функций, традиционно свойственных человеку, интеллектуальным системам для снижения трудозатрат и для повышения эффективности реализации данных функций за счет возможностей интеллектуальных систем. Это обстоятельство выдвигает особые требования к конфигурации ТП ИИ, диктуя его человекообразность (соразмерность человеку) – соразмерность его содержания и функционала ценностям человека и общества как индивидуальных и коллективных субъектов [9]. Человекообразность применительно к ИИ означает необходимость разработки технологического и гуманитарного обеспечения непротиворечивого и гармоничного взаимодействия ИИ с человеком во всех сферах человеческой жизнедеятельности, а в конечном итоге – конвергенции возможностей человека и ИИ в рамках единой социально-технологической среды.

Попробуем структурировать составляющие ТП ИИ. Как уже отмечалось ранее, ТП – это генетически и функционально связанная совокупность технологий, обладающая системными свойствами. При этом элементы ТП должны обладать взаимозависимостью и развиваться совместно, обладая возможностями взаимной модификации в процессе развития. ТП имеет следующие ключевые структурные элементы: базовую технологию; базовую онтологию; замыкающую технологию; базовую инфраструктуру; базовые институты (рис. 1) [10, 11]. Рассмотрим их подробнее.

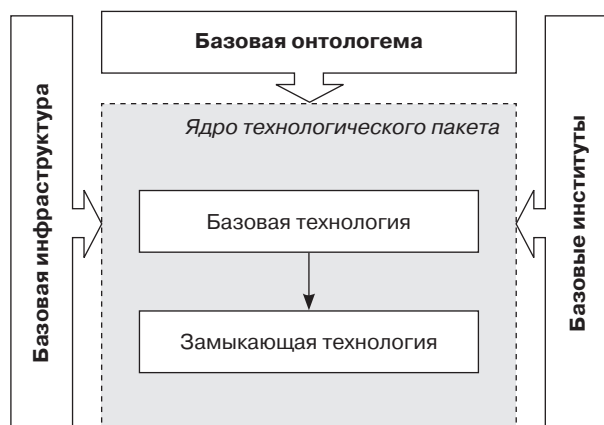


Рис. 1. Ключевые структурные элементы ТП

Базовая технология – это технология, осуществляющая возможность реализации ТП, т.е. технология, развитие которой привело к его формированию. В отношении ИИ базовой технологией является машинное обучение (machine learning), в особенности глубокое обучение (deep learning) [12, 13]. Эти технологии используют сложные алгоритмы и нейронные сети для обучения систем ИИ и определения закономерностей в больших объемах данных. Машинное обучение и глубокое обучение в настоящее время стали основой развития многих передовых областей ИИ, таких как компьютерное зрение, обработка естественного языка и предсказательные (предиктивные) аналитические системы.

Базовая онтологема – теоретическая идея, лежащая в основе ТП, иначе говоря – это идея, лежащая в основе представлений о пакете. Базовой онтологемой ИИ является идея возможности делегировать творческие функции, традиционно свойственные человеку, интеллектуальным системам. Эта же онтологема обуславливает человекоподобность ИИ.

Замыкающая технология – физическая или гуманитарная технология, достраивающая набор слабо связанных между собой технологий до системно организованного пакета. В отношении ИИ замыкающей технологией может стать создание так называемого «общего искусственного интеллекта» – мыслящей системы, способной иметь более одной конкретной цели, переключаться между ними, менять и обновлять их, в т.ч. в произвольном порядке [14]. Современные системы ИИ могут превосходить человека в какой-либо отдельной задаче, но свободное переключение между целями и их обновление по-прежнему является прерогативой человека.

Базовая инфраструктура – критически важная инфраструктура для развития технологии на конкретной фазе технологического и общественного развития. Базовая инфраструктура во многом является предельной формой реализации ТП. Например,

для ТП атомной энергии – это атомные реакторы, способные производить энергию, а также создавать новые делящиеся материалы. В отношении ИИ базовой инфраструктурой являются облачные вычисления, суперкомпьютеры, интегрированные системы хранения и анализа данных, а также специализированные аппаратные средства, такие как графические и тензорные процессоры (англ. – graphics processor unit и tensor processor unit), ассоциированные с сетью и контейнерами. Эти инфраструктурные элементы предоставляют возможность обрабатывать и анализировать огромные объемы данных, необходимых для обучения моделей ИИ, и обеспечивают масштабируемость для разработки и развертывания связанных с ним интеллектуальных систем. Предельной формой реализации этой инфраструктуры может стать концепция «искусственного глобального суперинтеллекта» (англ. – artificial global superintelligence) [15], предполагающая создание интегрированной сети самообучающихся алгоритмов и супермощных вычислительных систем на уровне всего мира и доступной всеобщему использованию. Эта гипотетическая структура сможет обрабатывать и управлять сложными процессами в режиме реального времени, предсказывать и решать глобальные проблемы, а также поддерживать саморазвитие и масштабируемость непрерывно улучшающихся систем ИИ [16].

Базовые институты – это институциональные решения, лежащие в основе ТП. Базовые институты ИИ, с учетом человекоподобности этой технологии, во многом повторяют структуру практически всех значимых общественных институтов. В их перечень входят:

- научно-исследовательские организации (университеты, лаборатории, исследовательские центры и др.), технологические компании и стартапы;
- открытые источники инноваций и творческие сообщества (проекты с открытым исходным кодом и независимые коллективы разработчиков);
- органы государственной власти и международные организации, которые разрабатывают и поддерживают программы и стандарты развития ИИ. Также в этот перечень входят институциональные механизмы и стандарты по защите данных, регулированию использования ИИ и обеспечению безопасности, надежности и прозрачности технологий ИИ;
- учебные заведения и программы, обеспечивающие развитие навыков и компетенций, необходимых для работы с технологиями ИИ, а также поддержание постоянной актуализации знаний для адаптации к быстрому развитию этой сферы;

Таблица 1. Таксономия ключевых структурных элементов ТП ИИ

№ п/п	Ключевые структурные элементы	Характеристика	Содержание
1	Базовая технология	Осуществляет возможность реализации ТП	Машинное обучение, глубокое обучение
2	Базовая онтологема	Теоретическая идея, лежащая в основе ТП и представлений о нем	Возможности делегировать творческие функции, традиционно свойственные человеку, интеллектуальным системам
3	Замыкающая технология	Достраивает набор первоначально слабо связанных между собой технологий до системно организованного ТП	«Общий искусственный интеллект» – система, способная иметь более одной конкретной цели, переключаться между ними, менять и обновлять их, в т.ч. в произвольном порядке
4	Базовая инфраструктура	Критически важная инфраструктура для развития ТП, предельная форма его реализации	Облачные вычисления, суперкомпьютеры, интегрированные системы хранения и анализа данных, специализированные аппаратные средства
5	Базовые институты	Институциональные решения, лежащие в основе ТП	Научные и образовательные организации, технологические компании, стартапы, независимые коллективы, органы власти, платформы коммуникации, нормативы, стандарты

- институты и платформы, которые стимулируют общественное обсуждение этических, правовых и социальных вопросов, связанных с ИИ, и обеспечивают вовлечение различных групп в гармоничное взаимодействие с ИИ.

Перечисленные выше структурные элементы ТП ИИ представлены в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Представление об ИИ как о ТП позволяет рассматривать данный сложный научно-технический феномен во всей совокупности его технологических, инфраструктурных, институциональных и социальных взаимодействий. ИИ при этом приобретает целостное семантическое видение в методологической и нормативной правовой среде. ИИ по его функционалу и характеру связей в рамках концепции ТП является соразмерной человеку *техносоциальной системой*, демонстрирующей тенденции к *динамичной и нелинейной самоэкспансии*. Последнее обстоятельство обусловлено уникальной для технологического объекта возможностью ИИ как нетривиальной машины [17] подключать собственное внутреннее состояние в ответ на внешнее воздействие. В первую очередь это выражается в способности самообучения ИИ – машинного обучения и глубокого обучения. Именно эта специфика ИИ требует дальнейшей проработки таксономии его ТП. Как отмечалось ранее, ИИ не является замкнутой изолированной системой. Благодаря своей самообучающейся природе, обуславливающей его динамичное развитие, ИИ вынужден находиться в *состоянии обратной*

афферентации [18] – корректировки «поведения» на основе информации, получаемой из окружающей технологической и социальной среды. Получая исходные данные извне, ИИ как функциональная система сопоставляет их с целевыми установками (внутренними программами, заложенными человеком) и, проанализировав их, осуществляет коррекцию своих деятельностных (вычислительных) актов. При этом человек в совокупности его связей с ИИ и его сервисными приложениями выступает в качестве *акцептора результатов действия* [18] *искусственного интеллекта*, фактически принимая на себя роль не самостоятельного субъекта, а *стадии функциональной системы искусственного интеллекта*.

В этой связи представляется актуальным дополнить методологию ТП ИИ, введя в него понятие *метатехнологии*. *Метатехнология* – это технология, испытывающая на себе воздействия внешней среды, преобразующие ее от начального состояния к конечному. При этом под начальным состоянием понимается современное нам фрагментированное представление об ИИ как о наборе невязанно связанных цифровых инструментов (вещей) с ограниченным функционалом, а под конечным – соразмерный человеку ИИ, включенный в максимальное количество видов мыслительной и деятельностной активности человека. Иными словами, под конечным состоянием метатехнологии ИИ понимается совокупность систем, процессов и решений (актов воздействия), находящихся в состоянии интерактивного единства с человеком, способных влиять на его образ жизни (определять его в значительной степени), мышления и деятельности, изменять

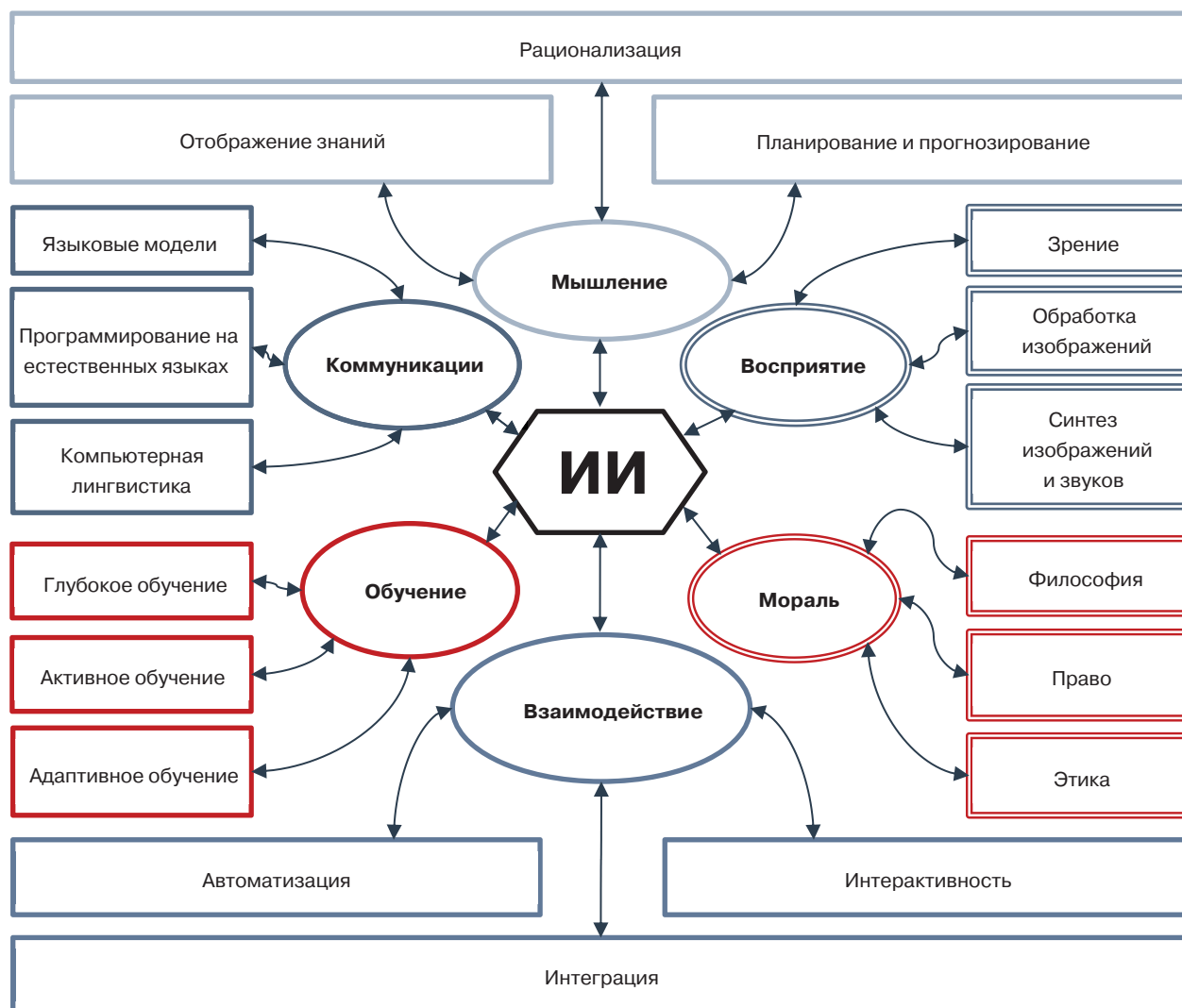


Рис. 2. ИИ в пространстве метатехнологических связей

характер взаимодействий человека как с социо-, так и с техносредой (рис. 2).

Таксономия пакета метатехнологий выстраивается вокруг возможности делегировать творческие функции, традиционно свойственные человеку, интеллектуальным системам, основанным на технологических принципах ИИ. Разумеется, на текущем уровне развития систем не представляется возможным делегировать ИИ все творческие функции человека как индивида и как коллективного субъекта, поэтому при конструировании пакета метатехнологий речь идет о базовых функциях, обеспечивающих творческий процесс человека и творческую коммуникацию, таких как рационализация/планирование, обучение, коммуникативное взаимодействие, восприятие, деятельностное взаимодействие и восприятие. Каждая из этих функций может быть относительно легко ассоциирована с технологическими системами и компонентами ИИ (табл. 2).

Таким образом, таксономия ключевых структурных элементов пакета метатехнологий ИИ содержит:

- функциональные элементы, полностью/частично ассоциирующиеся с творческими функциями человека: рассуждение, планирование, обучение, коммуникация, восприятие, интеграция и взаимодействие, мораль и этика;
- акты воздействия/взаимодействия функциональных элементов с человеком: отображение информации и знаний, автоматизированное мышление/рационализация, оптимизация планирования, машинное обучение, программирование на естественных языках, компьютерное зрение, робототехника и автоматизация, интегрированные сервисы ИИ, этика ИИ;
- технологическое наполнение, позволяющее осуществлять акты воздействия/взаимодействия функциональных элементов с человеком.

Таблица 2. Таксономия ключевых структурных элементов пакета метатехнологий ИИ

Функциональный элемент	Акт воздействия/взаимодействия с человеком	Ключевые направления технологического наполнения ТП
Рассуждение	Отображение знаний, автоматизированное рассуждение, рассуждение на основе «здравого смысла»	Рассуждения на основе конкретных случаев, индуктивное программирование, каузальные выводы, теория информации, каузальные модели, представление знаний и рассуждений
Планирование	Оптимизация планирования, обработка поисковых запросов	Байесовская оптимизация, иерархическая сеть задач, задачи удовлетворения ограничений, метаэвристическая оптимизация
Обучение	Машинное обучение	Активное обучение, адаптивное обучение, генеративная состязательная сеть, генеративные модели, глубокое обучение
Коммуникация	Взаимодействие/программирование на естественных языках	Чат-боты, генерация естественного языка, вычислительная лингвистика, машинный перевод, разговорные модели
Восприятие	Компьютерное зрение	Распознавание действий, распознавание объектов, распознавание лиц
	Обработка аудиосигналов	Синтез звуков, распознавание речи, разделение источников звука, синтез речи
Интеграция и взаимодействие	Мультиагентные интеллектуальные системы	Агент-ориентированное моделирование, сетевой интеллект, теория игр, роевой интеллект, интеллектуальные агенты
	Автоматизация и робототехника	Когнитивные системы, робототехнические системы, взаимодействие «человек – машина»
	Автоматизированные и автоматические транспортные средства	Автономное вождение, беспилотные системы, автономные системы
Мораль и этика	Этика ИИ	Подотчетность, надежность, объяснимость
	Философия ИИ	Философия «слабого (узкого) ИИ», философия «сильного (общего) ИИ»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показывает необходимость вывода ИИ за рамки узкой парадигмы восприятия его как набора слабо связанных друг с другом технологических инструментов, изолированных от многоаспектного социального контекста, в которых они могут применяться. Напротив, за счет способности к самообучению и демонстрации им ограниченных тенденций к саморазвитию, ИИ необходимо рассматривать как развивающийся сложный техносociальный феномен – технологический пакет, включающий в себя технологии, социальные отношения, инфраструктурные элементы, институциональное обеспечение и т.д. Такое структурированное представление ИИ показано в данной статье впервые в отечественной и зарубежной практике. При этом, учитывая сложную специфику ИИ как комплекса технологических решений, позволяющих имитировать когнитивные функции человека и получать при выполнении конкретных задач

результаты, сопоставимые с результатами интеллектуальной деятельности человека, в данном исследовании было введено и теоретически обосновано понятие метатехнологии ИИ – технологии, преобразующейся под воздействием среды и обретающей качественно новое состояние, а именно – состояние соразмерного человеку ИИ, включенного в максимальное количество видов человеческой мыслительной и деятельностной активности. Значение данного нового понятия подчеркивается спецификой ИИ как динамически развивающегося феномена, который в настоящее время еще не обрел окончательно оформившийся теоретический и методологический аппарат, способный учитывать все особенности ИИ.

В рамках концепции ТП ИИ неизбежно приобретает экономическое, социальное, правовое и культурное значение, становясь в подлинном смысле «сквозной» технологией, пронизывающей практически все сферы человеческой жизнедеятельности. Это обстоятельство выдвигает новые требования к стратегиям, методологическим документам

и государственным программам, определяющим развитие систем ИИ на государственном и отраслевом уровнях. В техосоциальном измерении стратегия развития ИИ должна охватывать все сферы его потенциального внедрения, основываясь на адекватной многофакторной модели возможностей, рисков и угроз, которые сулит внедрение этой трансформирующей технологии. Восприятие ИИ как пакета

технологий способствует целостной семантической репрезентации этой технологии в методологической и нормативной правовой среде, что облегчит гармонизацию внедрения ИИ на государственном и отраслевом уровнях, позволит снять технологическое напряжение в обществе и в итоге сгладить некоторые общественные противоречия, вызванные внедрением новых технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Saveliev A., Zhurenkov D. Artificial intelligence and social responsibility: the case of the artificial intelligence strategies in the United States, Russia, and China. *Kybernetes*. 2021;50(3):656–675. <https://doi.org/10.1108/K-01-2020-0060>
2. Floridi L. AI as Agency Without Intelligence: on ChatGPT, Large Language Models, and Other Generative Models. *Philos. Technol.* 2023;36(1):15. <https://doi.org/10.1007/s13347-023-00621-y>
3. Arnetz B.B. Technological stress: psychophysiological aspects of working with modern information technology. *Scand. J. Work Environ. Health*. 1997;23(Suppl. 3):97–103. URL: <https://www.jstor.org/stable/40966711>
4. Загвязинский В.И., Строкова Т.А. Сопротивление инновациям: сущность, способы профилактики и преодоления. *Образование и наука*. 2014;1(3):3–21. <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2014-3-3-21>
5. Floridi L., Cowls J., Beltrametti M., et al. AI4People—An Ethical Framework for a Good AI Society: Opportunities, Risks, Principles, and Recommendations. *Minds & Machines*. 2018;28:689–707. <https://doi.org/10.1007/s11023-018-9482-5>
6. Дубровский Д.И., Ефимов А.Р., Лепский В.Е., Славин Б.Б. Фетиш искусственного интеллекта. *Философские науки*. 2022;65(1):44–71. <https://doi.org/10.30727/0235-1188-2022-65-1-44-71>
7. Желтов А.О. Понятие технологического пакета. *Инновации*. 2007;12:48–52.
8. Скрыльникова Н.А. Управление инновационными процессами на основе концепции технологического пакета. *Вестник Томского государственного университета. Экономика*. 2010;4(12):52–58. URL: <https://www.lib.tsu.ru/mminfo/000063105/ec/12/image/12-052.pdf>
9. Малахова Е. Аксиология техники – на пути к человекоразмерности сложных технических систем. *Вопросы философии*. 2022;10:218–222. <https://doi.org/10.21146/0042-8744-2022-10-218-222>
10. Переслегин С.Б., Ютанов Н.Ю. *Сценарирование технологического развития. Часть 1. Сценарии технологического развития. Методология неизбежного будущего и эволюция современных технологических пакетов*. М.: РНЦ «Курчатовский институт»; 2009. 48 с. ISBN 978-5-9900-9966-1
11. Никитин В.А., Переслегин С.Б. *Инженерная онтология. Инженерия как странствие*. Екатеринбург: ООО «Издательский Дом «Ажур»; 2013. 631 с. ISBN 978-5-9125-6156-6

REFERENCES

1. Saveliev A., Zhurenkov D. Artificial intelligence and social responsibility: the case of the artificial intelligence strategies in the United States, Russia, and China. *Kybernetes*. 2021;50(3):656–675. <https://doi.org/10.1108/K-01-2020-0060>
2. Floridi L. AI as Agency Without Intelligence: on ChatGPT, Large Language Models, and Other Generative Models. *Philos. Technol.* 2023;36(1):15. <https://doi.org/10.1007/s13347-023-00621-y>
3. Arnetz B.B. Technological stress: psychophysiological aspects of working with modern information technology. *Scand. J. Work Environ. Health*. 1997;23(Suppl. 3):97–103. Available from URL: <https://www.jstor.org/stable/40966711>
4. Zagvyazinsky V.I., Strokova T.A. Resistance to innovation: essence, ways of prevention and overcoming. *Obrazovanie i nauka = The Education and Science J*. 2014;1(3):3–21 (in Russ.). <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2014-3-3-21>
5. Floridi L., Cowls J., Beltrametti M., et al. AI4People—An Ethical Framework for a Good AI Society: Opportunities, Risks, Principles, and Recommendations. *Minds & Machines*. 2018;28:689–707. <https://doi.org/10.1007/s11023-018-9482-5>
6. Dubrovsky D.I., Efimov A.R., Lepsky V.E., Slavin B.B. The fetish of artificial intelligence. *Filosofskie nauki = Russ. J. Philosophic. Sci*. 2022;65(1):44–71 (in Russ.). <https://doi.org/10.30727/0235-1188-2022-65-1-44-71>
7. Zheltov A.O. Concept of technological package. *Innovatsii = Innovations*. 2007;12:48–52 (in Russ.).
8. Skrylnikova N.A. Managing innovation processes on the basis of the concept of technological package. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika = Tomsk State University J. of Economics*. 2010;4(12):52–58 (in Russ.). Available from URL: <https://www.lib.tsu.ru/mminfo/000063105/ec/12/image/12-052.pdf>
9. Malakhova E. Axiology of Technology – on the way to human dimension of complex technical systems. *Voprosy Filosofii*. 2022;10:218–222 (in Russ.). <https://doi.org/10.21146/0042-8744-2022-10-218-222>
10. Pereslegin S.B., Yutanov N.Yu. *Stsenirovanie tekhnologicheskogo razvitiya. Chast' 1. Stsenarii tekhnologicheskogo razvitiya. Metodologiya neizbezhnogo budushchego i evolyutsiya sovremennykh tekhnologicheskikh paketov* (Science and Technology Development Scenarios. Part 1. Technology Development Scenarios. “The Unavoidable Future.” Scenario-Building Methodology and Evolution of Technological Packages). Moscow: Kurchatov Institute; 2009. 48 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9900-9966-1

12. Desai J., Watson D., Wang V., et al. The epistemological foundations of data science: a critical review. *Synthese*. 2022;200:469. <https://doi.org/10.1007/s11229-022-03933-2>
13. Mökander J., Sheth M., Watson D.S., et al. The Switch, the Ladder, and the Matrix: Models for Classifying AI Systems. *Minds & Machines*. 2023;33:221–248. <https://doi.org/10.1007/s11023-022-09620-y>
14. Орлов Д.Е., Орлова Н.А. Аутопойезис техносоциальных систем как фактор разрастания социальных рисков. *Вестник РУДН. Серия: Социология*. 2015;15(2):59–68. URL: <https://journals.rudn.ru/sociology/article/viewFile/6456/5909?ysclid=ln1ec44hj3506917384>
15. Pohl J. Artificial Superintelligence: Extinction or Nirvana? In: *Proceedings for InterSymp-2015, IIAS, 27th International Conference on Systems Research, Informatics, and Cybernetics (InterSymp-2015)*. 2015. URL: https://digitalcommons.calpoly.edu/arch_fac/82/
16. Ефимов А.Р. Посттьюринговая методология: разрушение стены на пути к общему искусственному интеллекту. *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2020;2:74–80. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2020-2-74>
17. Луман Н. *Введение в системную теорию*; пер. с нем. М.: Логос; 2007. 360 с. ISBN 978-5-8163-0076-6
18. Анохин П.К. Методологическое значение кибернетических закономерностей. В кн.: *Материалистическая диалектика и методы естественных наук*. М.: Наука; 1968. С. 547–587.
11. Nikitin V.A., Pereslegin S.B. *Inzhenernaya ontologiya. Inzheneriya kak stranstvie (Engineering Ontology. Engineering as Wandering)*. Ekaterinburg: Azhur; 2013. 631 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9125-6156-6
12. Desai J., Watson D., Wang V., et al. The epistemological foundations of data science: a critical review. *Synthese*. 2022;200:469. <https://doi.org/10.1007/s11229-022-03933-2>
13. Mökander J., Sheth M., Watson D.S., et al. The Switch, the Ladder, and the Matrix: Models for Classifying AI Systems. *Minds & Machines*. 2023;33:221–248. <https://doi.org/10.1007/s11023-022-09620-y>
14. Orlov D.E., Orlova N.A. Autopoiesis of Techno-Social Systems as a Factor of Social Risks Proliferation. *Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Sotsiologiya = RUDN J. Sociology*. 2015;15(2):59–68 (in Russ.). Available from URL: <https://journals.rudn.ru/sociology/article/viewFile/6456/5909?ysclid=ln1ec44hj3506917384>
15. Pohl J. Artificial Superintelligence: Extinction or Nirvana? In: *Proceedings for InterSymp-2015, IIAS, 27th International Conference on Systems Research, Informatics, and Cybernetics (InterSymp-2015)*. 2015. Available from URL: https://digitalcommons.calpoly.edu/arch_fac/82/
16. Efimov A.R. Post-turing methodology: destruction of the wall on the way to general artificial intelligence. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii = Intellect. Innovations. Investments*. 2020;2:74–80 (in Russ.). <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2020-2-74>
17. Luhmann N. *Vvedenie v sistemnyuyu teoriyu (Introduction to Systems Theory)*. Transl. from German. Moscow: Logos; 2007. 360 p. (in Russ.). ISBN 978-5-8163-0076-6
18. Anokhin P.K. Methodological Significance of Cybernetic Laws. In: *Materialisticheskaya dialektika i metody estestvennykh nauk (Materialistic Dialectics and Methods of Natural Sciences)*. Moscow: Nauka; 1968. P. 547–587 (in Russ.).

Об авторе

Довгучиц Сергей Иванович, д.э.н., доцент, генеральный директор ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт «Центр» (123242, Россия, Москва, ул. Садовая-Кудринская, д. 11, стр. 1); заведующий кафедрой «Математическое обеспечение информационных систем» Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78), заслуженный экономист Российской Федерации, действительный член Российской академии ракетных и артиллерийских наук, член Морской коллегии при Правительстве Российской Федерации. E-mail: redaktor@vniicentr.ru. SPIN-код РИНЦ 3395-8509, <https://orcid.org/0000-0001-6095-8315>

About the author

Sergey I. Dovguchits, Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor, General Director, All-Russia Scientific and Research Institute “Center” (11-1, Sadovaya–Kudrinskaya ul., Moscow, 123242 Russia); Head of the Department “Mathematical Support for Information Systems”, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia); Honored Economist of the Russian Federation, Full Member of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences, Member of the Marine Board under the Government of the Russian Federation. E-mail: redaktor@vniicentr.ru. RSCI SPIN-code 3395-8509, <https://orcid.org/0000-0001-6095-8315>

УДК 004.2

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-99-108>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Об архитектуре распределенной геоинформационной технологии мониторинга снежного покрова, функционирующей в обстоятельствах ограниченной телекоммуникационной доступности

Ю.В. Бельшева[®],
Д.Д. Сутягин,
Э.С. Зимина

Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, 105064 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: meteoinfo@list.ru

Резюме

Цель. Снежный покров оказывает комплексное многофакторное влияние на окружающую среду, являясь связующим звеном между глобальными климатическими процессами и системой земной поверхности. Мониторинг снежного покрова является одной из ключевых задач гидрометеорологии, в рамках которого проводится систематический регулярный сбор его показателей. Целью работы является разработка архитектуры геоинформационной технологии мониторинга снежного покрова, комплексно решающей проблему автоматизации сбора показателей снежного покрова и их дальнейшего сопровождения, а также расширяемой для других задач гидрометеорологического мониторинга.

Методы. Используется метод анализа существующей фундаментальной базы в области сбора данных снежного покрова, а также метод системного подхода при описании архитектуры распределенной геоинформационной технологии.

Результаты. Разработана архитектура распределенной геоинформационной технологии, ориентированная на мониторинг снежного покрова, от выполнения измерений, агрегации данных и их валидации до их передачи в централизованную систему обработки. Разработан прототип модулей носимого пользовательского терминала, позволяющий провести апробацию данной технологии.

Выводы. Предложенная архитектура способна функционировать в обстоятельствах ограниченной телекоммуникационной доступности, а также обеспечивать контроль целостности данных и персонализацию ответственности за их получение путем введения электронной подписи каждого сеанса измерений. Данная архитектура может быть расширена путем разработки и внедрения модулей для других типов измерений.

Ключевые слова: снегомерный маршрут, снегомерная съемка, сбор данных, геоинформационная система, мониторинг, архитектура геоинформационной системы

• Поступила: 10.11.2023 • Доработана: 19.11.2023 • Принята к опубликованию: 27.11.2023

Для цитирования: Бельшева Ю.В., Сутягин Д.Д., Зимина Э.С. Об архитектуре распределенной геоинформационной технологии мониторинга снежного покрова, функционирующей в обстоятельствах ограниченной телекоммуникационной доступности. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):99–108. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-99-108>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Architecture of distributed geoinformation technology for snow cover monitoring in circumstances of limited telecommunications accessibility

Yulia V. Belysheva[@],
Daniil D. Sutyagin,
Elizabet S. Zimina

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, 105064 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: meteoinfo@list.ru

Abstract

Objectives. Snow cover has a complex multifactorial impact on the environment as a link between global climatic processes and the system of the Earth's surface. Snow cover monitoring is one of the key tasks of hydrometeorology which also requires the systematic regular collection of its indicators. This work aims to develop an architecture of geoinformation technology for snow cover monitoring with the purpose of addressing the problem of automating the collection of snow cover indicators and their further maintenance. This architecture can also be used for other hydrometeorological monitoring tasks.

Methods. This paper analyzes the existing fundamental basis of snow cover data collection and uses the method of systems approach to describe the architecture of distributed geoinformation technology.

Results. The paper presents an architecture of distributed geoinformation technology focused on snow cover monitoring from measurements, data aggregation, and validation to their transfer to a centralized processing system. A prototype of portable user terminal modules for testing this technology is developed.

Conclusions. The proposed architecture is capable of functioning in circumstances of limited telecommunication availability, while ensuring data integrity control and personalization of responsibility by introducing an electronic signature of each measurement session. This architecture can be expanded by developing and implementing modules for other types of measurements.

Keywords: snow measuring route, snow measuring survey, data collection, geoinformation system, monitoring, geoinformation system architecture

• Submitted: 10.11.2023 • Revised: 19.11.2023 • Accepted: 27.11.2023

For citation: Belysheva Yu.V., Sutyagin D.D., Zimina E.S. On the architecture of a distributed geoinformation technology for monitoring snow cover, functioning in circumstances of limited telecommunications accessibility. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):99–108. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-99-108>

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

Снежный покров оказывает комплексное многофакторное влияние на окружающую среду, являясь связующим звеном между глобальными климатическими процессами и системой земной поверхности. Он определяет величину годового стока, уровень весеннего половодья, ледовый режим рек, интенсивность наледных и лавинных процессов, годовой баланс ледников [1]. Совокупность излучательных, отражательных и изоляционных свойств снежного покрова существенно снижает поступление коротковолновой радиации к поверхности земли, тем самым оказывая влияние на климатическую составляющую, что приводит к выхолаживанию воздуха и образованию приземных радиационных инверсий температуры [2, 3]. Одновременно с этим сокращая потери тепла в атмосферу, он уменьшает промерзание почв и амплитуды колебаний температуры, предотвращая вымерзание сельскохозяйственных культур [4].

Снежный покров является индикатором загрязнения атмосферного воздуха и последующего загрязнения почвы, поверхностных и подземных вод [5], что позволяет оценить суммарные параметры загрязнения в зимней период [6, 7]. Кроме того, снежный покров обеспечивает водными ресурсами значительную часть населения Земли [8].

Таким образом, мониторинг снежного покрова является одной из ключевых задач гидрометеорологии, в рамках которой проводится систематический регулярный сбор таких показателей снежного покрова, как:

- общая высота снежного покрова,
- распределение плотности снежного покрова по его толщине,
- наличие и концентрация примесей: взвешенные вещества, оксид углерода, диоксид азота, сероводород, фенол, толуол, ксилол, бензол, формальдегид, бенз(а)пирен,

что позволяет в результате оценить ключевые для хозяйственной деятельности показатели:

- запас воды (водный эквивалент) в снежном покрове;
- объем годового стока рек,
- уровень весеннего половодья,
- ледовый режим рек,
- интенсивность наледных и лавинных процессов,

- годовой баланс ледников,
- продолжительность залегания снежного покрова,
- сроки разрушения снежного покрова (для определения продолжительности вегетационного периода).

В настоящий момент существует множество подходов к измерению показателей снежного покрова, основанных на методах дистанционного зондирования Земли космическими [9, 10, 11] и внутриатмосферными аппаратами¹ [12], в т.ч. современными беспилотными летательными аппаратами [13, 14], а также методами, предполагающими непосредственное присутствие на местности автоматизированных измерительных станций², собирающих, в т.ч., видеовые (фото и видео) материалы [15, 16], либо специалистов-метеорологов [17], применяющих как разрушающие, так и неразрушающие техники, например, основанные на лазерном³ или радиоизлучении [18]. Задействование мобильных устройств, например, для измерения давления, позволяет обеспечить беспрецедентную плотность покрытия и территориальный охват [19], а их использование для сбора данных об осадках позволяет дополнять прогностические карты [20].

К сожалению, текущий уровень развития технологий не позволяет обеспечить сбор всех необходимых показателей без применения полевых методов, а главное, без регулярного присутствия «в поле» квалифицированного специалиста-гидрометеоролога. Более того, в отечественной практике отсутствует системный подход к проблеме автоматизации полевой работы специалистов-метеорологов. Значительная часть работы выполняется вручную, с применением аналоговых инструментов и бумажных журналов

¹ Koch F., Appel F. et al. *GPS-based measurements of snow cover properties for snow-hydrological, risk and snow quality applications*. Conference: EGU General Assembly. Vienna; 2019.

² Свидетельство о государственной регистрации. Станции автоматизированные метеорологические «Snow». Номер госреестра: 52771-13. [State registration certificate. *Automated meteorological stations "Snow"*. State registration number: 52771-13 (in Russ.)].

³ Roy A., Langlois A., Montpetit B., Royer A., Champolion N., Ghislain R., Domine F., Fily M. *Field measurements of snow grain specific surface area using near-infrared photography and laser reflectometry in Northern Canadian tundra*. AGU Fall Meeting Abstracts. 2010.

фиксации результатов измерений, что требует их последующей оцифровки, и, как следствие, является потенциальным источником ошибок и уязвимостей системы к проявлениям человеческого фактора.

Согласно [21] происходит изменение плана работ на метеорологической сети⁴, в частности сокращение снегомерных измерений, что связано с отсутствием приборов и недостаточностью квалификации персонала.

Целью работы является разработка архитектуры геоинформационной технологии мониторинга снежного покрова, комплексно решающей проблему автоматизации сбора показателей снежного покрова и их дальнейшего сопровождения, а также расширяемой для других задач гидрометеорологического мониторинга.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Для решения поставленной задачи необходимо создать функционально-масштабируемую и интегрируемую систему, позволяющую обеспечивать взаимодействие с множеством потенциальных потребителей данных, в т.ч. уже внедренных информационных и геоинформационных систем, а также с автоматизированными измерительными комплексами, отдельными первичными (измерительными) преобразователями, приемниками спутниковых систем навигации (GPS, ГЛОНАСС и др.), средствами фотовидеофиксации и специализированным измерительным оборудованием, не исключая при этом возможности использования аналогового измерительного оборудования за счет возможности интерактивного пользовательского ввода.

Ввиду потенциально высокой важности собираемой информации необходимо обеспечить сбор и хранение всех первичных и промежуточных данных, а также сопутствующих сведений, позволяющих впоследствии подтвердить как факт выполнения измерений, так и корректность процедуры измерений, а также воспроизвести все необходимые вычисления. Также требуется возможность удостоверения каждой серии измерений электронной подписью, связанной с конкретным специалистом, выполняющим измерения, либо с отдельным измерительным прибором или комплексом.

Мониторинг на обширной и неоднородной территории, характерной для Российской Федерации, требует учета географической распределенности пунктов наблюдения, включая пункты на труднодоступных территориях, и уровня их технологического оснащения.

Главным требованием к технологическому оснащению перспективной системы является учет

ограниченной телекоммуникационной доступности: отсутствия или нерегулярности доступа к публичным телекоммуникационным сетям у носимых пользовательских терминалов и у локальной сети пункта наблюдений; плохой связи между пользовательским терминалом и локальной сетью пункта наблюдений; использовании медленных и нестабильных каналов связи, в т.ч. ассиметричных. В отдельных случаях прямая телекоммуникационная доступность может быть невозможна, а передача данных может осуществляться только с помощью съемных носителей.

Значительная часть компьютерного оборудования отдельных пунктов наблюдений, главным образом, носимые пользовательские терминалы, может функционировать в экстремальных условиях, что предполагает высокую вероятность выхода из строя отдельных устройств. Для создания перспективной системы это должно быть скомпенсировано избыточностью хранения наиболее ценных данных.

В качестве носимых пользовательских терминалов могут быть использованы потребительские мобильные устройства на платформе Android – смартфоны и планшеты. Другие компоненты системы могут функционировать на базе персональных компьютеров, серверов общего назначения, а также специализированных устройств с ограниченными вычислительными ресурсами.

АРХИТЕКТУРА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Ключевым решением предлагаемой архитектуры является одноранговая (пиринговая) модель коммуникаций, предполагающая формирование системы, как совокупности однородных узлов, обменивающихся неизменяемыми пакетами данных. Данная модель концептуально схожа с распределенными сетями хранения данных, например, InterPlanetary File System (IPFS)⁵ и может рассматриваться как упрощенная версия другой разработки авторов [22], отличающаяся только сбором данных, но не предоставлением их и сервисов на их основе потребителям.

Единицей хранения и передачи данных между узлами сети является *пакет*. Каждый пакет в системе однозначно идентифицируем по следующему набору метаданных:

- дате и времени создания по всемирному координированному времени (англ., Coordinated Universal Time – UTC);
- идентификатору создавшего пакет узла (universally unique identifier, UUID),

⁴ Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2020 году: Справочное издание. Санкт-Петербург: РИАЛ; 2021. 56 с. [Review of the State of the Hydrological Observing System, Data Processing and Preparation of Information Products in 2020: Reference Edition. St. Petersburg: RIAL; 2021. 56 p. (in Russ.)]

⁵ Benet J. Content Addressed, Versioned, P2P File System. IPFS. 2014.

Таблица 1. Типы и приоритеты пакетов данных в распределенной геоинформационной системе

Приоритет	Тип	Описание
1	Манифест	Декларирует факт наличия измерений. Содержит ограничивающие прямоугольники, позволяющие построить пространственный индекс данных без их наличия. Должен быть минимального объема
2	Результат измерений	Содержит ценный для дальнейшей обработки результат измерений
3	Первичные данные	Для сложных измерительных приборов содержит первичные данные, позволяющие повторить расчет результата
4	Сопутствующие данные	Содержит данные, не несущие непосредственной ценности, но позволяющие подтвердить достоверность полученных результатов, например, данные фотовидеофиксации, треки спутниковых систем навигации и т.п.



Рис. 1. Принципиальная схема узла распределенной геоинформационной системы. СУБД – система управления базами данных, FTP(S) – file transfer protocol + secure sockets layer

- идентификатору набора пакетов (UUID) – может повторяться для нескольких пакетов, если они относятся к одной серии измерений,
- приоритету пакета,
- коду типа пакета,
- хеш-сумме содержимого.

Пакет может быть однозначно представлен в виде файла, что позволяет пользователю использовать любой доступный ему способ их передачи.

Для удобства эксплуатации ядро системы может непосредственно поддерживать несколько протоколов обмена файлами. При наличии прямой телекоммуникационной доступности, даже постоянной, может быть использован любой файло-ориентированный протокол. Среди современных криптографически защищенных протоколов можно отметить SFTP (secure file transfer protocol)⁶ и UFTP (UDP-based file transfer protocol, UDP – user

datagram protocol)⁷. Важным достоинством UFTP для целей разрабатываемой системы является возможность его применения в каналах связи с высокой пропускной способностью, но высокой латентностью, что характерно, например, для спутниковой связи, используемой в труднодоступных территориях. В условиях отсутствия прямой телекоммуникационной доступности возможно использование передачи данных на основе съемных носителей – так называемых SneakerNet [23]. Одним из программных пакетов, реализующих необходимую функциональность, является NNCP (node to node copy)⁸.

Приоритизация пакетов позволяет сначала передать наиболее ценные для оперативной обработки данные.

Предполагаемые типы и приоритеты пакетов представлены в табл. 1.

Принципиальная схема узла сети представлена на рис. 1.

⁶ Ylonen T., Lehtinen S. *SSH File Transfer Protocol draft-ietf-secsh-filexfer-02.txt*. SSH Communications Security Corp. October, 2001. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-ietf-secsh-filexfer-02>. Дата обращения 01.11.2023. / Accessed November 01, 2023.

⁷ UFTP – Encrypted UDP based FTP with multicast. URL: <https://uftp-multicast.sourceforge.net/>. Дата обращения 01.11.2023. / Accessed November 01, 2023.

⁸ NNCP. URL: <http://www.nncpgo.org/>. Дата обращения 01.11.2023. / Accessed November 01, 2023.

Помимо базовых модулей, общих для всех узлов, выделяются отдельные типы узлов, ориентированные на решение различных задач в сети:

- носимые пользовательские терминалы: сбор данных, ручной ввод, взаимодействие с измерительным оборудованием;
- узлы автоматизированного сбора данных: сохранение данных с измерительного оборудования;
- персональные компьютеры пункта наблюдений: агрегация данных, первичный анализ, визуализация;
- сервер: агрегация данных с большого количества источников, хранение большого объема данных, предоставление веб-интерфейса.

Для направления потоков данных между узлами вводятся уровни узлов и следующие правила:

- уровень 1 присваивается носимым пользовательским терминалам, непосредственно осуществляющим сбор данных;
- более высокие уровни присваиваются узлам локальных пунктов наблюдения, и далее – региональным и федеральным узлам;
- при взаимодействии узлов одного уровня данные синхронизируются в обе стороны, что обеспечивает резервное копирование;
- при взаимодействии узлов разных уровней данные передаются от узла меньшего уровня узлу большего уровня, что обеспечивает агрегацию сведений.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ ПОЛЕВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Автоматизация процедуры полевых измерений выполняется программными модулями, предназначенными для размещения на носимом пользовательском терминале. Они предусматривают возможность первичного ввода и корректировки измеренных значений, выполнения расчетов, визуализации данных в табличных и графических форматах.

Результаты измерений вносят в приложение непосредственно во время проведения измерений на маршруте. Расчет средних параметров и запаса воды производится автоматически.

Для выполнения снегосъемки требуются градуированная рейка и весовой снегомер. Процесс снегосъемки предполагает сбор данных о результатах следующих измерений:

- высота снежного покрова (отсчет по шкале градуированной линейки);
- отсчет по шкале цилиндра весового снегомера;
- отсчет по линейке весов весового снегомера;
- толщина ледяной корки (отсчет по шкале градуированной линейки);

- толщина слоя снега, насыщенного водой (отсчет по шкале градуированной линейки);
- структура снежного покрова;
- степень покрытия снегом;
- степень покрытия ледяной коркой;
- состояние поверхности почвы под снегом (таялая, мерзлая).

Наблюдения за снежным покровом на снегомерных маршрутах начинаются, когда снегом покрыто 6 баллов и более видимой окрестности и заканчиваются после разрушения устойчивого снежного покрова (степень покрытия менее 5 баллов).

Порядок выполнения наблюдений с применением разработанных программных модулей следующий:

1. Прохождение идентификации и аутентификации специалиста-метеоролога.
2. Включение геопозиции на первой точке измерения высоты снежного покрова.
3. Высота снежного покрова измеряется каждые двадцать метров с занесением данных измерений в соответствующие ячейки. Ячейка «ЗАМЕР №_» указывает, сколько замеров произведено.
4. Первая точка для измерения массы снежного покрова выбирается на расстоянии 50–100 м от начала маршрута. Далее измерения производят каждые 200 м. Всего измерений плотности снежного покрова – 10. Измерения высоты снежного покрова по цилиндру необходимы для вычисления плотности снежного покрова. Данные о высоте снежного покрова по цилиндру весового снегомера вносят в соответствующую ячейку. Ячейка «ОТСЧЕТ №_ ПО ШКАЛЕ ЦИЛИНДРА» указывает, сколько замеров по высоте снежного покрова цилиндром произведено.
5. После измерения высоты снежного покрова по цилиндру весового снегомера производят взвешивание снежного покрова. Данные по весам вносят в соответствующую ячейку. Ячейка «ОТСЧЕТ №_ ПО ВЕСАМ» указывает, сколько замеров по определению массы снежного покрова произведено. Плотность рассчитывается автоматически. Расчет плотности можно посмотреть, перейдя на вкладку «ПЛОТНОСТЬ». Нумерация ячеек «ПЛОТНОСТЬ №_» показывает, сколько замеров для расчета плотности произведено. Кроме измерения плотности в выбранных точках измеряется толщина слоя талой воды, слоя снега, насыщенного водой, толщина притертой ледяной корки, а также оценивается состояние почвы под снежным покровом (мерзлая или таялая). Ячейки для внесения данных открываются поочередно после внесения результатов измерения по каждой точке.

Если измерения не производились по причине отсутствия данных, ставится прочерк. Характеристика состояния поверхности почвы выбирается из предложенного списка: талая, мерзлая. Наличие снежной корки внутри снежного покрова и на поверхности снежного покрова отмечается: да, нет.

6. После прохождения маршрута метеоролог делает снимок поля и загружает в приложение для характеристики всего снегомерного маршрута. Снимок автоматически сохраняется.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ ВАЛИДАЦИИ ПОЛЕВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Автоматизация процедуры валидации полевых измерений выполняется модулями, предназначенными для размещения на носимом пользовательском терминале, а также на узлах, на которых предполагается дополнительный контроль качества измерений.

В настоящий момент предусмотренные проверки, по результатам которых пользователю может быть выдано предупреждение, основаны на разработанном алгоритме:

- количество измерений на снегомерном маршруте должно находиться в допустимом диапазоне;
- средняя высота снежного покрова на маршрутной линии должна быть больше или равна минимальной высоте снежного покрова или меньше, или равна максимальной высоте снега по рейке;
- средняя плотность снега, рассчитанная по данным измерениям снегомерного маршрута, должна быть больше или равна минимальной плотности снега и меньше или равна максимальной плотности снега рассчитанной по данным измерениям снегомерного маршрута;
- среднее содержание воды в снежном покрове, рассчитанное по данным измерениям снегомерного маршрута, должно быть больше или равно минимальному значению снегомерного маршрута и меньше или равно максимальному содержанию воды снегомерного маршрута.

С помощью графика, выведенного в приложении, можно определить сомнительные (потенциально некачественные) замеры непосредственно на маршруте и выполнить повторные замеры. Некачественные замеры могут возникнуть из-за человеческого фактора. В некоторых случаях метеоролог допускает ошибку при вводе результатов измерений. Линия маршрута на графике формируется на основании данных измерений, проведенных непосредственно на маршруте снегосъемки.

ПРОТОТИП ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Авторами был реализован прототип модулей носимого пользовательского терминала, ориентированный на выполнение в базе операционной системы Android версии не ниже 10. Особого внимания заслуживают элементы, позволяющие повысить качество собираемых данных путем оперативного обнаружения сомнительных измерений непосредственно в процессе выполнения снегосъемки. Так, график снегомерного маршрута (рис. 2) отражает номер снегосъемки, номер метеорологической станции, длину пройденного маршрута, длину оставшегося маршрута, минимальные и максимальные высоты измерений. С учетом того, что метеоролог обследует маршрут снегосъемки заблаговременно, до выпадения снежного покрова, он имеет план-схему линии маршрута с указанием перепадов и возвышенностей, а также отметками расположения объектов (дорога, деревья, кусты и т.д.), расположенных на маршрутной линии и на территории, окружающей по периметру маршрутную линию. Данные подгруженной карты позволяют по данным снегосъемки определить сомнительные измерения. Точки на линии, выделенные отличительным цветом, указывают на перепады высот снегомерного маршрута. Таблица расчетов средних параметров помогает выявить сомнительные измерения сразу на снегомерном маршруте. Сомнительные значения выделяются отдельным шрифтом, что указывает на возможную ошибку измерений (рис. 3).



Рис. 2. График маршрута снегосъемки с обозначением пунктов измерений

МАРШРУТНАЯ СНЕГОСЪЕМКА № 001										СТАНЦИЯ № 00000				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Сумма	Отсчет цилиндра, h, см	Линейка весов, m, г	Плотность, m/10h, г/см ³
10	50	48	53	52	46	50	50	54	51	58	512	46	94	0.2
20	54	47	46	41	50	52	48	53	51	52	494	50	78	0.2
30	58	51	41	51	52	47	49	49	52	51	502	52	108	0.2
40	47	50	45	53	48	49	50	47	46	54	489	48	87	0.2
50	50	51	37	52	41	50	43	45	51	50	470	41	59	0.1
60	50	54	43	43	52	50	53	46	49	51	491	52	102	0.2
70	51	52	42	54	48	51	48	47	47	47	487	48	91	0.2
80	54	50	41	53	47	56	50	44	55	50	500	47	100	0.2
90	48	53	51	52	44	40	49	48	49	47	481	44	89	0.2
100	47	46	53	47	44	50	49	51	54	48	489	44	90	0.2
Сумма	510	502	452	498	472	495	489	484	505	508	4915			
Средняя высота снежного покрова, см												49		1.9

ИЗМЕРЕНИЯ

ГЛАВНАЯ

ИЗМЕРЕНИЯ

ГЛАВНАЯ

Рис. 3. Таблица общих измерений с расчетом средних параметров снежного покрова на маршрутной снегосъемке

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная авторами архитектура распределенной геоинформационной технологии позволяет проводить мониторинг снежного покрова от выполнения измерений, агрегации данных и их валидации до их передачи в централизованную систему обработки. При этом данная архитектура способна

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ревякин В.С. *Снежный покров и лавины Алтая*. Омск: Национальный исследовательский Томский государственный университет; 1977. 215 с.
2. Неведьева Е.А. *Влияние снежного покрова на ландшафтные связи*. М.: Наука; 1975. 77 с.
3. Рихтер Г.Д. *Снежный покров, его формирования и свойства*. Л.: Изд-во Акад. наук СССР; 1945. 120 с.
4. Копанев И.Д. *Методы изучения снежного покрова*. Л.: Гидрометеиздат; 1971. 226 с.
5. Даунов Б.Я., Гапеев А.А. Возможность оценки состояния атмосферы по характеристикам загрязнения снега и почвы. *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы*. 2018;1(9):205–207.
6. Негрбов О.П., Астанин И.К., Стародубцев В.С., Астанина Н.Н. Снежный покров как индикатор состояния атмосферного воздуха в системе социально-гигиенического мониторинга. *Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация*. 2005;2:149–153.
7. Лабузова О.М., Носкова Т.В., Лысенко М.С., Овчаренко Е.А., Папина Т.С. Снежный покров городской территории как источник техногенного загрязнения поверхностных вод в период снеготаяния. *Принципы экологии*. 2016;4(20):33–41.

функционировать в обстоятельствах ограниченной телекоммуникационной доступности, а также обеспечивать контроль целостности данных и персонализацию ответственности за их получение путем введения электронной подписи каждого сеанса измерений. Архитектура может быть расширена путем разработки и внедрения модулей для других типов измерений.

В настоящее время разработан прототип модулей носимого пользовательского терминала, позволяющего провести их апробацию.

Дальнейшие исследования авторов будут посвящены сбору данных по снегомерному маршруту с помощью видовой информации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты получены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FSFE 2022-0002.

ACKNOWLEDGMENTS

The results were obtained within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FSFE 2022-0002.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

REFERENCES

1. Revyakin V.S. *Snezhnyi pokrov i laviny Altaya (Snow Cover and Avalanches in the Altai Mountains)*. Omsk: Tomsk State University; 1977. 215 p. (in Russ.).
2. Nefedeva E.A. *Vliyaniye snezhnogo pokrova na landshaftnye svyazi (Impact of Snow Cover on Landscape Connectivity)*. Moscow: Nauka; 1975. 77 p. (in Russ.).
3. Rihter G.D. *Snezhnyi pokrov, ego formirovaniya i svoystva (Snow Cover, its Formation and Properties)*. Leningrad: Izdatelstvo Akademii nauk SSSR; 1945. 120 p. (in Russ.).
4. Kopanev I.D. *Metody izucheniya snezhnogo pokrova (Methods of Studying Snow Cover)*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1971. 226 p. (in Russ.).
5. Daunov B.Y., Gapeev A.A. Possibility of atmospheric state estimation by characteristics of snow and soil pollution. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy = Fire Safety: Problems and Prospects*. 2018;(1)9:205–207 (in Russ.).
6. Negrobov O.P., Astanin I.K., Starodubtsev V.S., Astanina N.N. Snow cover as the indicator of the condition of atmospheric air in system of socially-hygienic monitoring. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya = Proceeding of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*. 2005;2:149–153 (in Russ.).

8. Hao J., Mind'je R., Feng T., Li L. Performance of snow density measurement systems in snow stratigraphies. *Hydrology Research*. 2021;52(4):834–846. <https://doi.org/10.2166/nh.2021.133>
9. Попова В.В., Морозова П.А., Титкова Т.Б., Семенов В.А., Черенкова Е.А., Ширяева А.В., Китаев Л.М. Региональные особенности современных изменений зимней аккумуляции снега на севере Евразии по данным наблюдений, реанализа и спутниковых измерений. *Лед и Снег*. 2015;55(4):73–86. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-4-73-86>
10. Rutter N., Essery R.L.H., Pomeroy J.W., Altimir N., et al. Evaluation of forest snow processes models (Snow-MIP2). *J. Geophys. Res. Atmospheres*. 2009;114(D6):D6111. <https://doi.org/10.1029/2008JD011063>
11. Salomonson V.V., Appel I. Estimating fractional snow coverage from MODIS using the Normalized Difference Snow Index (NDSI). *Remote Sensing of Environment*. 2009;89(3):351–360. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.10.016>
12. Anderson K.D. Determination of water level and tides using interferometric observations of GPS signals. *J. Atmospheric Oceanic Technol.* 2000;17(8):1118–1127. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017<1118:DO WLAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<1118:DO WLAT>2.0.CO;2)
13. Tarchi D., Guglieri G., Vespe M., Gioia C., Sermi F., Kyovtorov V. Mini-Radar System for Flying Platforms. In: *IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*. 2017;40–44. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace.2017.7999623>
14. Jenssen R.O.R., Eckerstorfer M., Jacobsen S. Drone-Mounted Ultrawideband Radar for Retrieval of Snowpack Properties. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020;69(1):221–230. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2893043>
15. Dong C., Menzel L. Smartphone-based measurements of the optical properties of snow. *Hydrological Processes*. 2017;31(16):2872–2886. <https://doi.org/10.1002/hyp.11229>
16. Allgaier M., Smith B. A smartphone-based sensor for measuring the optical properties of snow. *Appl. Opt.* 2022;61(15):4429–4436. <https://doi.org/10.1364/ao.457976>
17. Bulygina O.N., Groisman P.Ya., Razuvaev V.N., Korshunova N.N. Changes in snow cover characteristics over Northern Eurasia since 1966. *Environ. Res. Lett.* 2011;6(4):045204. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/045204>
18. Wang J., Hu Y., Li Z., Zhang C., Lei L., Wang J. Improving GPS-IR Snow Depth Estimation by Considering the Snow Surface Roughness. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2022;2356(1):012048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2356/1/012048>
19. Pimentel R., Herrero J., Zeng Y., Su B. Study of Snow Dynamics at Subgrid Scale in Semiarid Environments Combining Terrestrial Photography and Data Assimilation Techniques. *J. Hydrometeorology*. 2015;16(2):563–578. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0046.1>
20. Mernild S., Liston G., Hiemstra C., Steffen K. Surface Melt Area and Water Balance Modeling on the Greenland Ice Sheet 1995–2005. *J. Hydrometeorology*. 2008;9(6):1191–1211. <https://doi.org/10.1175/2008JHM957.1>
7. Labuzova O.M., Noskova T.V., Lysenko M.S., Ovcharenko E.A., Papina T.S. Snow cover as a source of technogenic pollution of surface water during the snow melting period. *Principy ekologii = Principles of the Ecology*. 2016;4(20):33–41 (in Russ.).
8. Hao J., Mind'je R., Feng T., Li L. Performance of snow density measurement systems in snow stratigraphies. *Hydrology Research*. 2021;52(4):834–846. <https://doi.org/10.2166/nh.2021.133>
9. Popova V.V., Morozova P.A., Titkova T.B., Semyonov V.A., Cherenkova E.A., Shiryaeva A.V., Kitaev L.M. Regional features of present winter snow accumulation variability in the North Eurasia from data of observations, reanalysis and satellites. *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2015;55(4):73–86 (in Russ.). <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-4-73-86>
10. Rutter N., Essery R.L.H., Pomeroy J.W., Altimir N., et al. Evaluation of forest snow processes models (Snow-MIP2). *J. Geophys. Res. Atmospheres*. 2009;114(D6):D6111. <https://doi.org/10.1029/2008JD011063>
11. Salomonson V.V., Appel I. Estimating fractional snow coverage from MODIS using the Normalized Difference Snow Index (NDSI). *Remote Sensing of Environment*. 2009;89(3):351–360. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.10.016>
12. Anderson K.D. Determination of water level and tides using interferometric observations of GPS signals. *J. Atmospheric Oceanic Technol.* 2000;17(8):1118–1127. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017<1118:DO WLAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<1118:DO WLAT>2.0.CO;2)
13. Tarchi D., Guglieri G., Vespe M., Gioia C., Sermi F., Kyovtorov V. Mini-Radar System for Flying Platforms. In: *IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*. 2017;40–44. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace.2017.7999623>
14. Jenssen R.O.R., Eckerstorfer M., Jacobsen S. Drone-Mounted Ultrawideband Radar for Retrieval of Snowpack Properties. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020;69(1):221–230. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2893043>
15. Dong C., Menzel L. Snow process monitoring in montane forests with time-lapse photography. *Hydrological Processes*. 2017;31(16):2872–2886. <https://doi.org/10.1002/hyp.11229>
16. Allgaier M., Smith B. Smartphone-based measurements of the optical properties of snow. *Appl. Opt.* 2022;61(15):4429–4436. <https://doi.org/10.1364/ao.457976>
17. Bulygina O.N., Groisman P.Ya., Razuvaev V.N., Korshunova N.N. Changes in snow cover characteristics over Northern Eurasia since 1966. *Environ. Res. Lett.* 2011;6(4):045204. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/045204>
18. Wang J., Hu Y., Li Z., Zhang C., Lei L., Wang J. Improving GPS-IR Snow Depth Estimation by Considering the Snow Surface Roughness. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2022;2356(1):012048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2356/1/012048>
19. Pimentel R., Herrero J., Zeng Y., Su B. Study of Snow Dynamics at Subgrid Scale in Semiarid Environments Combining Terrestrial Photography and Data Assimilation Techniques. *J. Hydrometeorology*. 2015;16(2):563–578. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0046.1>

21. Бельчиков В.А., Борщ С.В., Павроз Ю.А., Романов А.В., Сильницкая М.И., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Современное состояние и перспективы совершенствования системы оперативного гидрологического прогнозирования в Гидрометцентре России. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2019;4(374):184–202.
22. Gvozdev O.G., Vorobyev V.E. The concept of information infrastructure of a multi-satellite system for Earth remote sensing. In: *Proceedings of the 20th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2020*. 2020;20(2.2):275–284. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/2.2/s10.033>
23. Jaya A.C., Safitri C., Mandala R. Sneakernet: A Technological Overview and Improvement. In: *IEEE International Conference on Sustainable Engineering and Creative Computing (ICSECC)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/ICSECC51444.2020.9557509>
20. Mernild S., Liston G., Hiemstra C., Steffen K. Surface Melt Area and Water Balance Modeling on the Greenland Ice Sheet 1995–2005. *J. Hydrometeorology*. 2008;9(6):1191–1211. <https://doi.org/10.1175/2008JHM957.1>
21. Belchikov V.A., Borsch S.V., Pavroz Yu.A., Romanov A.V., Silnitskaya M.I., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Current Status and Prospects for Improving the Operational Hydrological Forecasting System in the Hydrometeorological Center of Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy = Hydrometeorological Research and Forecasting*. 2019;4(374):184–202 (in Russ.).
22. Gvozdev O.G., Vorobyev V.E. The concept of information infrastructure of a multi-satellite system for Earth remote sensing. In: *Proceedings of the 20th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2020*. 2020;20(2.2):275–284. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/2.2/s10.033>
23. Jaya A.C., Safitri C., Mandala R. Sneakernet: A Technological Overview and Improvement. In: *IEEE International Conference on Sustainable Engineering and Creative Computing (ICSECC)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/ICSECC51444.2020.9557509>

Об авторах

Бельшева Юлия Владимировна, преподаватель, кафедра информационно-измерительных систем ФГБОУ ВО «МИИГАиК – Московский государственный университет геодезии и картографии» (105064, Россия, Москва, Гороховский пер., д. 4). E-mail: meteoinfo@list.ru. <https://orcid.org/0009-0002-5785-3904>

Сутягин Даниил Денисович, преподаватель, кафедра информационно-измерительных систем ФГБОУ ВО «МИИГАиК – Московский государственный университет геодезии и картографии» (105064, Россия, Москва, Гороховский пер., д. 4). <https://orcid.org/0009-0009-8138-7756>

Зимина Элизабет Сергеевна, студент, ФГБОУ ВО «МИИГАиК – Московский государственный университет геодезии и картографии» (105064, Россия, Москва, Гороховский пер., д. 4). <https://orcid.org/0009-0003-7164-1681>

About the authors

Yulia V. Belysheva, Lecturer, Department of Information Measuring Systems, MIIGAik – Moscow State University of Geodesy and Cartography (4, Gorokhovsky per., Moscow, 105064 Russia). E-mail: meteoinfo@list.ru. <https://orcid.org/0009-0002-5785-3904>

Daniil D. Sutyagin, Lecturer, Department of Information Measuring Systems, MIIGAik – Moscow State University of Geodesy and Cartography (4, Gorokhovsky per., Moscow, 105064 Russia). <https://orcid.org/0009-0009-8138-7756>

Elizabet S. Zimina, Student, MIIGAik – Moscow State University of Geodesy and Cartography (4, Gorokhovsky per., Moscow, 105064 Russia). <https://orcid.org/0009-0003-7164-1681>

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический университет».

119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Подписано в печать 30.11.2023 г.

Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.

Уч.-изд. листов 13.5.

Тираж 100 экз. Заказ № 452.

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 November 30, 2023.

Format 60 × 90/8. Digital print.

C.p.l. 13.5.

100 copies. Order No. 452.

Subscription to the *Russian Technological
Journal* printed version can be made through
the *Kniga-Servis* Agency, www.akc.ru.

Subscription index: **79641**.

