

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



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
2022, том 10, № 4

Russian Technological Journal
2022, Vol. 10, No. 4

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



Russian Technological Journal
2022, том 10, № 4

Russian Technological Journal
2022, Vol. 10, No. 4

Дата опубликования 29 июля 2022 г.

Publication date July 29, 2022.

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

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.

Периодичность: один раз в два месяца.

Periodicity: bimonthly.

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).

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).

Учредитель и издатель:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«МИРЭА – Российский технологический университет»
119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Founder and Publisher:

Federal State Budget
Educational Institution
of Higher Education

«MIREA – Russian Technological University»
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia.

Журнал индексируется в РГБ, РИНЦ, eLibrary, Соционет, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD), Google Scholar, Open Archives Initiative, Ulrich's International Periodicals Directory.

The Journal is included in RSL (Russian State Library), Russian citation index, eLibrary, Socionet, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD), Google Scholar, Open Archives Initiative, Ulrich's International Periodicals Directory.

Главный редактор:

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

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.

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(495) 246-05-55 (#2-88).
E-mail: seredina@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(495) 246-05-55 (#2-88).
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).

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.

Индекс по объединенному каталогу «Пресса России» 79641.

The subscription index of *Pressa Rossii*: 79641.

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

Редакционная коллегия

- Кудж
Станислав Алексеевич** д.т.н., профессор, ректор РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, <https://orcid.org/0000-0003-1407-2788>, rector@mirea.ru
- Банис
Юрас Йонович** хабилитированный доктор наук, профессор, проректор Вильнюсского университета, Вильнюс, Литва. Scopus Author ID 7003687871, juras.banys@ff.vu.lt
- Бетелин
Владимир Борисович** академик Российской академии наук (РАН), д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Федерального научного центра «Научно-исследовательский институт системных исследований» РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 6504159562, ResearcherID J-7375-2017, betelin@niisi.msk.ru
- Боков
Алексей Алексеевич** 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, член Президиума 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, 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** член-корр. 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** 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** член-корр. 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** PhD (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** член-корр. 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, presnukhin@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** 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, 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** Dr. Sci. (Eng.), Corr. Member of the RAS, 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** 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** Corresponding Member of 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** Ph.D. (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** Corresponding Member of 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** *И.Т. Болбаков, В.А. Мордасинев, А.Д. Макарегин*
Сравнительный анализ алгоритмов сжатия четырехмерных световых полей
- 18** *А.Б. Сорокин, Л.М. Железняк, Д.В. Супруненко, В.В. Холмогоров*
Проектирование модулей системной динамики в системах поддержки принятия решений

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

- 27** *И.В. Унченко, А.А. Емельянов*
Модульная многопозиционная когерентная цифровая радиофотонная система
- А.А. Щукин, А.Е. Павлов*
- 38** *А.А. Щукин, А.Е. Павлов*
Параметризация пользовательских функций в цифровой обработке сигналов для получения углового сверхразрешения

Микро- и наноэлектроника. Физика конденсированного состояния

- В.Н. Каданцев, А.Н. Гольцов*
- 44** *В.Н. Каданцев, А.Н. Гольцов*
Коллективная динамика доменных структур в жидкокристаллических липидных бислоях
- С.А. Одинцов, Э.Г. Локк, Е.Н. Бегинин, А.В. Садовников*
- 55** *С.А. Одинцов, Э.Г. Локк, Е.Н. Бегинин, А.В. Садовников*
Эффекты невзаимности при распространении спиновых волн в двухслойном магнитном микроволноводе на основе пленок железо-иттриевого граната

Математическое моделирование

- Д.А. Карпов, В.И. Струченков*
- 65** *Д.А. Карпов, В.И. Струченков*
Сплайн-аппроксимация многозначных функций в проектировании трасс линейных сооружений
- А.В. Смирнов*
- 75** *А.В. Смирнов*
Свойства целевых функций и алгоритмов поиска в задачах многокритериальной оптимизации

Мировоззренческие основы технологии и общества

- М.А. Еремеев, О.В. Трубиенко, И.И. Захарчук*
- 86** *М.А. Еремеев, О.В. Трубиенко, И.И. Захарчук*
Применение подхода воспроизводимых исследований в процессе дистанционного обучения
- А.С. Сигов, И.В. Гладышев, А.Н. Юрасов*
- 93** *А.С. Сигов, И.В. Гладышев, А.Н. Юрасов*
Наноэлектроника и нанотехнологии: перспективные подходы в образовательном процессе

Contents

Information systems. Computer sciences. Issues of information security

- 7** *Roman G. Bolbakov, Vladimir A. Mordvinov, Artem D. Makarevich*
Comparative analysis of compression algorithms for four-dimensional light fields
- 18** *Aleksey B. Sorokin, Liliya M. Zheleznyak, Dmitry V. Suprunenko, Vladislav V. Kholmogorov*
Designing modules of system dynamics in decision support systems

Modern radio engineering and telecommunication systems

- 27** *Ivan V. Unchenko, Andrey A. Emelyanov*
Photonics-based modular multistate digital coherent system
- 38** *Andrey A. Shchukin, Aleksandr E. Pavlov*
Parameterization of user functions in digital signal processing for obtaining angular superresolution

Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

- 44** *Vasily N. Kadantsev, Alexey N. Goltsov*
Collective dynamics of domain structures in liquid crystalline lipid bilayers
- 55** *Sergey A. Odintsov, Edwin H. Lock, Evgeniy N. Beginin, Alexander V. Sadovnikov*
Nonreciprocal propagation of spin waves in a bilayer magnonic waveguide based on yttrium-iron garnet films

Mathematical modeling

- 65** *Dmitry A. Karpov, Valery I. Struchenkov*
Spline approximation of multivalued functions in linear structures routing
- 75** *Alexander V. Smirnov*
Properties of objective functions and search algorithms in multi-objective optimization problems

Philosophical foundations of technology and society

- 86** *Michail A. Ereemeev, Oleg V. Trubienko, Ivan I. Zakharchuk*
Applying a reproducible research approach to distance education
- 93** *Alexander S. Sigov, Igor V. Gladyshev, Alexey N. Yurasov*
Nanoelectronics and nanotechnology: promising approaches in the educational process

УДК 004.02
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-7-17>



ОБЗОР

Сравнительный анализ алгоритмов сжатия четырёхмерных световых полей

Р.Г. Болбаков[®],
В.А. Мордвинов,
А.Д. Макаревич

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

Резюме

Цели. Широкое распространение систем захвата световых полей обусловлено высоким качеством воспроизводимого изображения. Этот вид захвата, хоть и качественно превосходит традиционные подходы к захвату объемных изображений, генерирует огромное количество данных, необходимых для восстановления исходного захваченного четырехмерного светового поля. Цель работы – рассмотреть традиционные и расширенные до четырехмерной размерности алгоритмы сжатия изображений, провести их сравнительный анализ и определить наиболее подходящие из них.

Методы. Использованы математические методы обработки сигналов и методы статистического анализа.

Результаты. Проведены сравнение и анализ алгоритмов применительно к сжатию четырехмерных световых полей с использованием метрики PSNR. Установлено, что на выбранный критерий оценивания влияет не только размерность алгоритма сжатия, но также и расстояние базовой линии установки захвата, так как разница между изображениями увеличивается в зависимости от расстояния между оптическими центрами каждой матрицы камеры. Так для установок, состоящих из массива камер машинного зрения, находящихся на стойках и расположенных в помещении, очевидным выбором будет применение обычных методов сжатия изображений. Также, исходя из оценки произвольностей методов сжатия видео, замечено, что алгоритм XVC остается наиболее ценным, хотя его результаты оказываются выше остальных. Следующим по значимости можно считать алгоритм AV1. Установлено, что новейшие алгоритмы сжатия показывают более высокую производительность по отношению к своим предшественникам. Продемонстрировано, что при небольшом расстоянии между оптическими центрами запечатленных изображений применение алгоритмов сжатия видео более предпочтительно, чем применение алгоритмов сжатия изображений, так как они показывают более высокие результаты как в трехмерном, так и в четырехмерном варианте.

Выводы. Сравнение полученных результатов показывает необходимость применения на установках с длинной базовой линией (установленных на стойках камеры) алгоритмов из семейства сжатия видеозаписей (XVC, AV1). При работе с интегрированными камерами светового поля (Lytro) и установкой захвата с короткой базовой линией рекомендуется использовать алгоритмы сжатия изображений (JPEG). В общем случае рекомендуется использовать алгоритмы сжатия видео, в частности XVC, поскольку в среднем он показывает приемлемый уровень PSNR как в случае с короткой, так и с длинной базовой линией установки.

Ключевые слова: 3D-визуализации, 4D-световое поле, сжатие световых полей

• Поступила: 10.01.2022 • Доработана: 04.05.2022 • Принята к опубликованию: 20.06.2022

Для цитирования: Болбаков Р.Г., Мордвинов В.А., Макаревич А.Д. Сравнительный анализ алгоритмов сжатия четырехмерных световых полей. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):7–17. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-7-17>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REVIEW ARTICLE

Comparative analysis of compression algorithms for four-dimensional light fields

Roman G. Bolbakov[®],
Vladimir A. Mordvinov,
Artem D. Makarevich

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 19454, Russia

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

Abstract

Objectives. The widespread use of systems for capturing light fields is due to the high quality of the reproduced image. This type of capture, although quantitatively superior to traditional methods to capturing volumetric images, generates a huge amount of data needed to reconstruct the original captured 4D light field. The purpose of the work is to consider traditional and extended to four-dimensional image compression algorithms, to perform a comparative analysis and determine the most suitable.

Methods. Mathematical methods of signal processing and methods of statistical analysis are used.

Results. Algorithms are compared and analyzed in relation to the compression of four-dimensional light fields using the PSNR metric. The selected evaluation criterion is affected not only by the dimension of the compression algorithm, but also by the distance of the baseline of the capture setting, since the difference between images increases with the distance between the optical centers of each camera matrix. Thus, for installations consisting of an array of machine vision cameras located on racks and placed in a room, the obvious choice would be to use conventional image compression methods. Furthermore, based on the assessment of the arbitrariness of video compression methods, it should be noted that the XVC algorithm remains undervalued, although its results are higher. Algorithm AV1 can be considered the next in order of importance. It has been established that the latest compression algorithms show higher performance if compared to their predecessors. It has also been shown that with a small distance between the optical centers of the captured images, the use of video compression algorithms is preferable to the use of image compression algorithms, since they show better results in both three-dimensional and four-dimensional versions.

Conclusions. A comparison of the results obtained shows the need to use algorithms from the video compression family (XVC, AV1) on installations with a long baseline (mounted on camera stands). When working with integrated light field cameras (Lytro) and setting the capture with a short baseline, it is recommended to use image compression algorithms (JPEG). In general, video compression algorithms are recommended, in particular XVC, since on average it shows an acceptable level of PSNR in both the case of a short and long installation baseline.

Keywords: 3D visualization, 4D light field, light field compression

• Submitted: 10.01.2022 • Revised: 04.05.2022 • Accepted: 20.06.2022

For citation: Bolbakov R.G., Mordvinov V.A., Makarevich A.D. Comparative analysis of compression algorithms for four-dimensional light fields. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):7–17. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-7-17>**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

Информационные данные светового поля по своей природе описывают параметры света, испускаемого из точки пространства, захваченного, например, множеством камер [1] или камерой светового поля (light-field imaging) [2], основанной на пленочном принципе [3]. Требования к хранению и передаче таких данных сводятся зачастую к увеличению объема их хранилища и повышению производительности каналов передачи, поэтому разработка и исследование методов сжатия для световых полей в последние годы становятся все более актуальными. Несмотря на то, что существует множество эффективных форматов сжатия для неподвижных и движущихся изображений, в литературе выполнено лишь небольшое исследование влияния этих методов на свойства изображений светового поля [4]. В данной работе проведена оценка влияния современных методов сжатия изображений и видео на качество изображений, полученных на основе данных светового поля. Эти методы включают в себя последние стандарты сжатия видео, особенно AV1¹ [5]

¹ AOMedia Video 1 (AV1) – открытый стандарт сжатия видео, предназначенный для кодирования видео для потоковой передачи по сети Интернет. Он заменяет формат кодирования видео VP9, разработанный Google. Согласно [5], AV1 превосходит H.265/HEVC на 17%, а VP9 – на 13% в широком диапазоне битрейта/разрешений. Разрабатывается консорциумом за открытые медиа (AOMedia), созданным в 2015 г. и состоящим из компаний, занимающихся производством электроники, распространением видео по запросу и разработкой веб-браузеров (AMD, Apple, Arm, Broadcom, Intel, Nvidia, Amazon, Facebook, Google, Hulu, Netflix, Mozilla, Microsoft). Timothy B. Terriberry. Progress in the Alliance for Open Media (slides). URL: <https://people.xiph.org/~tterribe/pubs/lca2017/aom.pdf> (18 January 2017), дата обращения: 22.06.2017. [AOMedia Video 1 (AV1) is an open video compression standard for encoding video transmitted over the Internet. It replaces the VP9 video encoding format developed by Google. According to [5], AV1 outperforms H.265/HEVC by 17% and VP9 by 13% over a wide range of bitrates/resolutions. Developed by the Alliance for Open Media (AOMedia), created in 2015 and comprised of electronics, video-on-demand, and web browser companies (AMD, Apple, Arm, Broadcom, Intel, Nvidia, Amazon, Facebook, Google, Hulu, Netflix, Mozilla, Microsoft). Timothy B. Terriberry. Progress in the Alliance for Open Media (slides). URL: <https://people.xiph.org/~tterribe/pubs/lca2017/aom.pdf> (18 January 2017). Accessed June 22, 2017.]

и XVC² [6]. Чтобы в полной мере использовать потенциал распространенных методов сжатия изображений на четырехмерных изображениях светового поля, мы расширяем эти методы на трех- и четырехмерные измерения. В статье продемонстрировано, что данные четырехмерного светового поля могут быть сжаты гораздо сильнее, чем независимые неподвижные изображения при сохранении того же визуального качества воспринимаемого изображения.

Для описания трехмерной сцены из любого возможного положения наблюдателя определим функцию $P(x, y, z, \phi, \psi)$ [3], где (ϕ, ψ) – угол обзора камеры (в сферических координатах); (x, y, z) – абсолютное положение точки просмотра (рис. 1). Результатом выполнения функции P является цвет, описывающий визуальное отображение наблюдаемой точки пространства. Определением функции P может быть дополнено параметром t (время) для описания динамичной сцены.

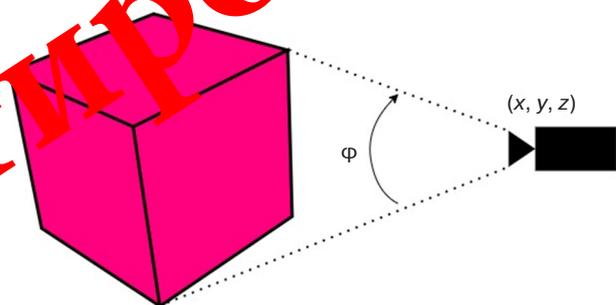


Рис. 1. Захват сцены с одной позиции просмотра. Для простоты угол обзора указан для одной сферической координаты

Наша задача – описать сцену путем съемки либо с помощью множества камер (camera array), либо с помощью одной компактной матрицы, которой предшествуют микролинзы, например, как в Lytro. В этом случае апертура может быть изображена в виде сетки видов (камер), расположенных на двумерной плоскости. Этот случай проиллюстрирован

² XVC – формат кодирования видео с сильным акцентом на потоковые приложения с низким битрейтом. На официальном сайте (URL: <https://xvc.io/>, дата обращения 04.12.2021) утверждается, что кодек превосходит AV1, H.265/HEVC и VP9. [XVC is a video encoding format with a strong focus on low bitrate streaming applications. The official website (URL: <https://xvc.io/>. Accessed December 04, 2021) claims that the codec is superior to AV1, H.265/HEVC, and VP9.]

на рис. 2, где расстояние на линии, проходящей через точки основания между отдельными видами, описывается параметром d . Это представление часто называют 4D-световым полем (англ. light field – LF), поскольку мы имеем дело с функцией светового поля L , дискретизированной в четырех измерениях (k, l, m, n) , где (m, n) – координаты пикселей; (k, l) – индексы изображения с субапертурой.

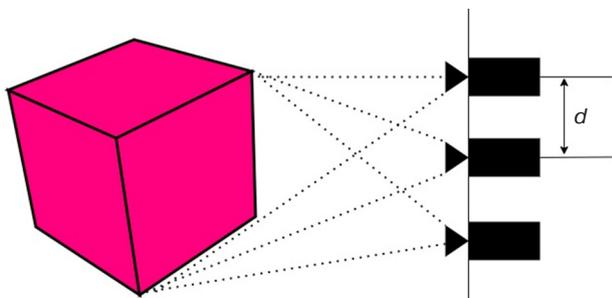


Рис. 2. Захват четырехмерного светового поля при помощи массива камер

Световые поля, получаемые одним компактным единым устройством, имеют ограничения по углу обзора. Световые поля, основанные на множестве камер, обеспечивают большие углы обзора за счет распределения матриц камер в пространстве вокруг объекта. На практике количество видов, рендеринговых на двумерной плоскости, колеблется от пары единиц. Учитывая высокое разрешение датчиков, неудивительно, что объем данных световом поле достигает огромных размеров. В качестве примера рассмотрим световое поле «Treasure Chest»³ (рис. 3), взятое из Стэнфордского архива световых полей. Это поле снимается с помощью сетки камер 17×17 с разрешением изображения 1536×1280 пикселей. Размер нескатых данных превышает 1 Гб. При использовании фото-последовательностей для организации видеороликов требования к хранению и передаче будут соразмерно увеличены.

МЕТОДЫ СЖАТИЯ 4D-СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ

В последнее время в литературе было предложено несколько методов сжатия 4D-световых полей [4, 5, 7–19]. С помощью некоторых из этих методов исследователи пытаются напрямую сжимать данные с датчиков, которым предшествуют микролинзы (изображения линз). С помощью других сжимают результирующее 4D-световое поле вместо обработки исходных «сырых» данных. В этой статье мы сосредоточимся только на последних.

Сравним различные современные методы сжатия, применимые к данным 4D-светового поля. Эти методы включают последние стандарты сжатия видео, особенно AV1 (утвержден в июне 2018 г.) и XVC (версия выпущена в июле 2018 г.). Чтобы провести сравнение, мы перефокусируем исходное и распакованное световое поле. Затем оценка проводится с использованием метрики PSNR (отношение пикового сигнала к шуму в исследуемой выборке, англ. peak signal-to-noise ratio) в качестве полномасштабного эталонного показателя оценки качества.

Отдельные отображения из исходного светового поля обычно не визуализируются. Поэтому нет смысла напрямую сравнивать исходное и распакованное световые поля, хотя такая методология обычно используется для оценки производительности сжатия одного вида. По этой причине будет использована методология оценки производительности сжатия для многофокусного рендеринга из [4]. Эта методология в основном заключается в оценке качества рендера представлений для нескольких контрольных точек. Визуализированные отображения получают путем объединения пикселей из разных 4D-видов светового поля для различных фокальных плоскостей. Среднее искажение вычисляется как среднее значение PSNR для нескольких визуализированных видов в фокальной плоскости. Методика сравнения проиллюстрирована на рис. 3. Обратим внимание,

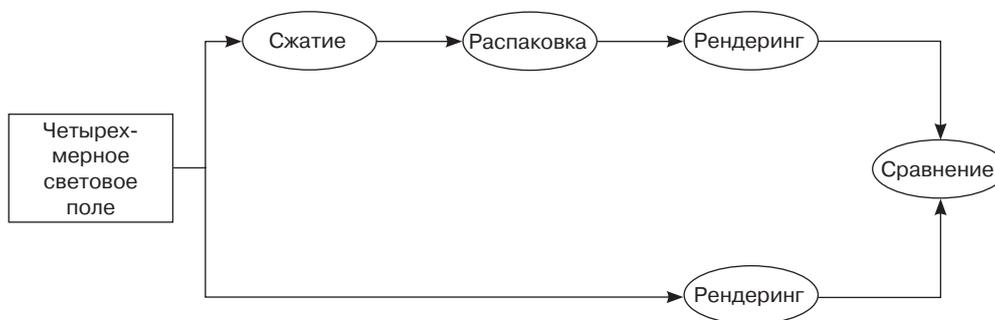


Рис. 3. Диаграмма потока данных методики сравнения алгоритмов сжатия

³ Stanford light-field dataset. URL: http://lightfield.stanford.edu/?gclid=Cj0KCQiA47GNBhDrARIsAKfZ2rD2CB3IMtzHJXPr0uXM_KJm_tElIZLviFERCFsasV9JygG55uBlaAtRTEALw_wcB, дата обращения: 04.12.2021. [Stanford light-field dataset. URL: http://lightfield.stanford.edu/?gclid=Cj0KCQiA47GNBhDrARIsAKfZ2rD2CB3IMtzHJXPr0uXM_KJm_tElIZLviFERCFsasV9JygG55uBlaAtRTEALw_wcB. Accessed December 04, 2021.]

что PSNR вычисляется из среднего квадрата ошибки по всем трем цветовым компонентам.

Световое поле 4D содержит двумерную сетку двумерных видов, захваченных с камер. Длина базовой линии между отдельными видами колеблется от нескольких миллиметров (микролинзы) до нескольких сантиметров (массив камер). Поэтому естественно ожидать высокого сходства видов, смежных в любом из двух направлений сетки. Это сходство открывает путь к пониманию данных 4D-светового поля как видеоряда, перемещающегося между точками обзора. Альтернативно мы можем рассматривать четырехмерное световое поле как трехмерное или непосредственно как четырехмерное тело. Описанные выше подходы также могут быть отражены в сжатии светового поля с помощью системы кодирования изображений, видео, объемных или четырехмерных изображений. Хотя возможны и другие подходы (например, использование 3D-видео).

В последние годы в сторонних работах сравнивались и оценивались характеристики сжатия различных подходов к изображениям светового поля.

В [4] авторы оценили производительность основных стандартов кодирования изображений с независимыми видами и H.265/HEVC⁴ с независимыми видами. Пометка «с независимыми видами» является обозначением того, что отдельные виды были сжаты независимо друг от друга. Подходы к кодированию видео в работе не оценивались. Как и следовало ожидать, внутренний профиль H.265/HEVC оказался на 10% более эффективным методом сжатия.

В [7] авторы сравнили производительность сжатия трех стратегий с использованием кода H.265/HEVC. В первой стратегии выполняется сжатие непосредственно с помощью пленоптического изображения. В следующей стратегии организуются виды четырехмерного светового поля в виде псевдоследовательности в спиральном порядке, и впоследствии происходит их сжатие. В последней стратегии сжатие происходит на подмножестве изображений, извлеченном из пленоптического изображения, посредством преобразования в четырехмерное световое поле. Результаты проведенной авторами работы показывают, что кодирование четырехмерного светового поля приводит к лучшей производительности по сравнению с непосредственным кодированием изображений, полученных с камер.

⁴ H.265/HEVC (high efficiency video coding, англ.) – высокоэффективное кодирование видеоизображений; MPEG-H – стандарт сжатия видео, разработанный в качестве преемника широко используемого H.264/AVC (MPEG-4). [H.265/HEVC is a high efficiency video coding; MPEG-H is a video compression standard developed as a successor to the widely used H.264/AVC (MPEG-4).]

Авторы работы [8] сравнили производительность JPEG⁵, JPEG 2000 и SPIHT⁶ непосредственно на изображениях, полученных с матриц камер. Сравнение проводилось с использованием той же методологии, что и в данной статье. Как и следовало ожидать, JPEG 2000 демонстрирует наилучшую производительность сжатия.

В [9] авторы предложили переставить четырехмерное световое поле как представление в виде плиток большого прямоугольного изображения. Затем это изображение сжималось с помощью кодера JPEG 2000. Предложенная схема была сравнена со стандартными алгоритмами кодирования изображений, а именно, JPEG 2000 и JPEG XR. Однако неясно, как точно эти стандартные алгоритмы кодирования были применены к данным 4D-светового поля.

В [10] автор перестраивает четырехмерное световое поле в трехмерное тело. Затем трехмерный объем кодируется с использованием схемы 3D DCT на блоках $8 \times 8 \times 8$ аналогично системе кодирования JPEG.

Помимо обычных методов кодирования существует также альтернативный подход [11], который использует глубокое обучение для оценки 2D-представлений из разреженных наборов 4D-представлений. Другой подход [12] предлагает собственную схему разреженного кодирования для всего четырехмерного светового поля, основанную на нескольких оптимизированных ключевых представлениях.

Метод, описанный в [13], опирается на построение суперлучей, которые ограничивают суперпиксели, образующие данный суперлуч. Это ограничение необходимо для того, чтобы суперлучи можно было использовать в качестве поддержки уменьшения угловой размерности на основе приближения матрицы низкого ранга. Затем вычисляется приближение матрицы низкого ранга для суперлучей с компенсацией несоответствия с применением разложения по сингулярным значениям (англ. singular value decomposition – SVD). Затем базовые векторы кодируются с использованием HEVC или JPEG-Pleno VM 1.1 для каждого отдельного представления.

В [14, 15] авторы предлагают иерархическую структуру кодирования для четырехмерных световых полей. Четырехмерное световое поле разбивается на несколько видов, а затем организует их в структуру кодирования в соответствии с пространственными координатами. Все представления закодированы иерархически. Схема реализована в справочном программном обеспечении H.265/HEVC.

⁵ JPEG – Joint Photographic Experts Group (англ.), по названию организации-разработчика. [JPEG – Joint Photographic Experts Group, titled after the name of the developer.]

⁶ SPIHT – set partitioning in hierarchical trees (англ.) – пространственно упорядоченные иерархические деревья. [SPIHT is a set partitioning in hierarchical trees.]

В [16] авторы предлагают схему кодирования, которая разделяет четырехмерное световое поле на несколько центральных видов и остальные смежные виды. Смежные виды вычитаются из центральных видов, и затем обе группы кодируются с помощью кодека H.265/HEVC. Авторы [17, 18] передают четырехмерное световое поле в кодек H.265/HEVC, используя режим взаимного прогнозирования для отдельных видов LF. Наконец, огромное внимание было уделено подходам сжатия на основе сверточных нейронных сетей [19, 20]. Из вышесказанного видно, что схемы кодирования JPEG 2000 и особенно H.265/HEVC довольно популярны при сжатии четырехмерных световых полей.

В настоящей статье мы сравниваем производительность основных современных методов сжатия с потерями. Эти методы можно разделить на четыре группы в зависимости от способа обработки данных 4D LF. Первая группа охватывает следующие методы кодирования изображений: JPEG и JPEG 2000. В [21] их называют методами, основанными на самоподобии. Вторая группа включает методы кодирования видео: H.265/HEVC, AV1, VP9 и XVC. В основном их называют методами, основанными на псевдопоследовательности. Третья группа расширяет методы кодирования изображений в трех измерениях. Эта группа состоит из JPEG 3D и JPEG 2000 3D. Обращаем внимание, что JPEG 3D относится к объемному изображению, а не к паре стереоскопических изображений. Четвертая группа расширяет методы кодирования изображений в четырех измерениях. Однако в этой группе существует только один метод – JPEG 4D.

Для оценки вышеуказанных методов используются следующие кодеки: OpenJPEG, x264 (библиотека кодеков AV1), Libvpx (SDK кодеков VP8/VP9), кодек XVC.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В этом разделе представлен набор данных, метод многофокусной визуализации, эксперименты, проведенные с этим набором данных, и полученные результаты.

Набор данных состоит из четырех 4D-световых полей, основанных на двух типах устройств захвата. Два световых поля были сняты с помощью пленочной камеры Lytro Illum B01 (произв. компания Lytro, США), а два других – с помощью обычных DSLR камер.

Первое обычное световое поле камеры было снято с помощью матрицы из нескольких камер, а другое – с помощью простого моторизованной установки, оснащенной цифровой камерой Canon Rebel XTi (произв. компания Canon, Япония). Соответствующие разрешения и соответствующие диапазоны расхождений изображений перечислены в таблице. Значения в последнем столбце – расхождение изображений – описывают

разницу в пикселях в местоположении одного и того же 3D-объекта, спроецированного на изображения, снятые камерой или вычисленные по изображению пленочной камеры, в случае Lytro.

Как можно заметить, диапазон расхождений будет узким (от -1 до $+1$ пикселя) для светового поля с плотной выборкой (короткой базовой линией) в случае применения камеры Lytro и широким (от 40 до 90 пикселей) – для изображений, полученных массивом камер. Эти значения, очевидно, коррелируют с фокусным расстоянием камеры и расстоянием между центрами камер или пленочных линз в случае Lytro. Для удобства центральный вид для каждого светового поля показан на рис. 4.



Рис. 4. Набор данных, использованных для сравнения. Слева направо: Danger de mort, Chessboard, Treasure Chest, Palais du Luxemburg

На рис. 4 первое и последнее световое поле снимаются с помощью пленочной камеры; Chessboard снимается с помощью массива камер; Treasure Chest снимается с помощью моторизованной установки с зафиксированной на ней камерой.

Цифровая перефокусировка изображений в виртуальной фокальной плоскости достигается с помощью алгоритма суммирования сдвигов (shift-sum algorithm) [22]. Этот алгоритм сдвигает изображения (виды) с субапертурой в соответствии с оптическим центром камеры относительно базовой линии камеры относительно опорного кадра и накапливает соответствующие значения пикселей. Перефокусированное изображение будет средним значением преобразованных изображений. Вычисление значения пикселя в точке (m, n) перефокусированного изображения E_d задается уравнением:

$$E_d(m, n) = \frac{1}{N} \sum_{k,l} L(k, l, m + \alpha k, n + \alpha l), \quad (1)$$

где N – количество суммированных изображений; α – расстояние синтетической плоскости от основного объектива; k и l – индексы субапертурного

Таблица. Набор данных, использованных для сравнения

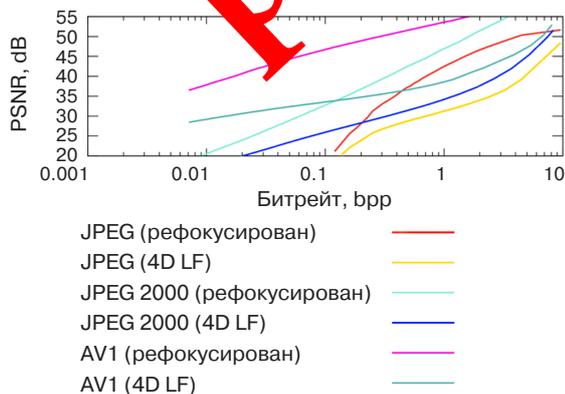
Описание	Источник	Разрешение	Расхождение в пикселях
Danger de mort	EPLF датасет	$15 \times 15 \times 625 \times 434$	От -1 до 1
Chessboard	Саарландский университет	$8 \times 8 \times 1920 \times 1080$	От 40 до 90
Treasure Chest	Стэндфордская лаборатория компьютерной графики	$17 \times 17 \times 1536 \times 1280$	От -1 до 7
Palais du Luxemburg	EPFL датасет	$15 \times 15 \times 625 \times 434$	От -1 до 1

изображения представления светового поля; ak и al – параметры сдвига по отношению к системе отсчета. Также выполнена линейная интерполяция в двух последних 4D-измерениях, чтобы преобразовать функцию выборочного светового поля в непрерывную.

ЭКСПЕРИМЕНТ 0

Предварительно стоит уточнить, действительно ли необходимо оценивать качество изображений, отображаемых для нескольких фокусных точек, а не на исходных данных (т.е. напрямую сравнивать исходный и распакованный набор изображений). Быстрый эксперимент показывает, что между этими подходами существует большая разница (рис. 5). Она составляет около 10 децибел в PSNR в зависимости от битрейта и метода сжатия. Это можно объяснить тем фактом, что любой пиксель в отображаемом виде представляет собой сумму пикселей из четырехмерного светового поля, так что эта сумма в совокупности уменьшает количество артефактов сжатия. Другими словами, мы можем позволить себе сжимать 4D-световые поля гораздо сильнее, чем независимые изображения, сохраняя при этом то же визуальное качество отображаемого изображения.

На рис. 5 показана разница в оценке качества с использованием 4D-светового поля напрямую по сравнению с использованием изображений, визуализированных в виртуальных фокальных плоскостях. Иллюстрация приведена на световом поле Danger de mort.

**Рис. 5.** Эксперимент 0. Разница в оценке качества

ЭКСПЕРИМЕНТ 1

Как видно из обзора литературы, большинство современных подходов к сжатию световых полей обрабатывают либо 2D-данные, либо их последовательность (сжатие видео). Сжатие четырехмерных изображений световых полей все еще остается относительно неисследованной областью. Поскольку четырехмерное световое поле представляет собой последовательности 2D-изображений (точек обзора), методы сжатия 2D можно использовать для независимого кодирования точек обзора. Однако такие методы не позволяют использовать корреляции пикселей во всех четырех измерениях. Аналогичные рассуждения можно использовать и для 3D-методов. В нашем эксперименте 0 мы были заинтересованы в изучении эффектов сжатия световых полей в трех и четырех измерениях. Чтобы справедливо оценить производительность сжатия, для случаев 2D, 3D и 4D необходимо использовать идентичный метод сжатия. Таким образом, в работе используется пользовательская реализация метода сжатия JPEG с возможностью обработки данных 2D, 3D или 4D. Кроме того, известно о существовании стандарта JPEG 2000 с возможностью сжатия 2D- и 3D-данных одним и тем же способом. К сожалению, JPEG 2000 не работает с 4D-изображениями. Поскольку сходство соседних пикселей в трехмерном и четырехмерном изображении сильно зависит от базовой линии камеры, можно ожидать разных результатов. Результат этого эксперимента показан на рис. 6. На каждом графике горизонтальная ось показывает битрейт (бит на пиксель), а вертикальная ось – среднее значение PSNR для нескольких визуализированных точек обзора в фокальной плоскости.

На световых полях с небольшой базовой линией (Danger de mort и Palais du Luxemburg) оба метода 3D-сжатия явно превосходят свои 2D-аналоги по всему диапазону битрейта. Аналогично, метод 4D JPEG явно превосходит свой 3D-аналог.

Это неудивительно, потому что пиксели в одном и том же пространственном положении на соседних видах сильно коррелированы. Однако ситуация меняется с увеличением базовой линии. При этом (Treasure Chest и Chessboard) смежные виды становятся все

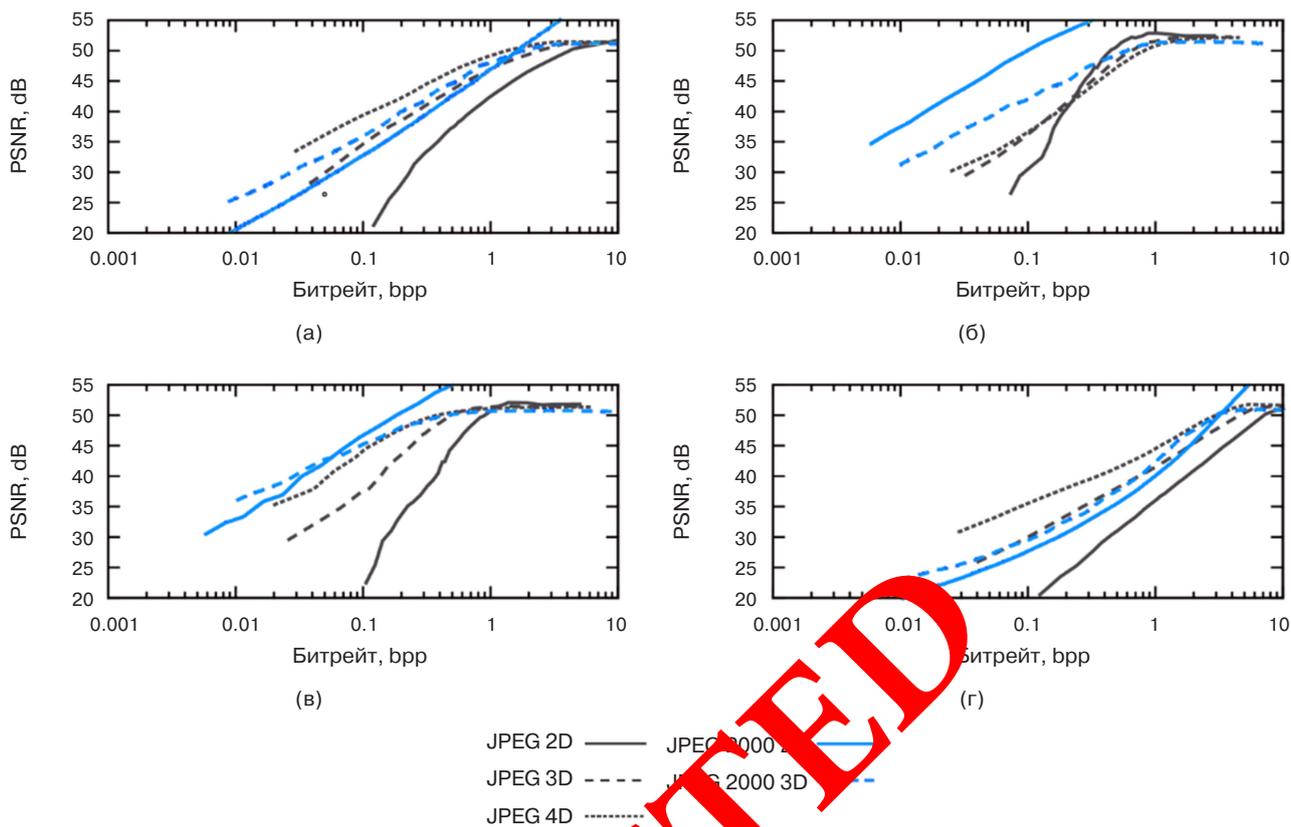


Рис. 6. Эксперимент 1. Сравнение производительности методов сжатия изображений: (а) Danger de mort, (б) Chessboard, (в) Treasure Chest, (г) Palais du Luxemburg

менее и менее похожими, что приводит к более высоким амплитудам базовых коэффициентов при кодировании. Следовательно, ситуация меняется в пользу методов сжатия с меньшими размерами.

Учитывая метод JPEG, Treasure Chest является особым случаем, поскольку он содержит большое количество черных пикселей. Оказывается, что более эффективно сжимать эти сплошные области сразу с помощью одного 4D-блока, чем с помощью нескольких 3D-блоков. Аналогично, более эффективным будет использование одного 3D-блока, чем нескольких 2D-блоков.

ЭКСПЕРИМЕНТ 2

Второе, на что следует обратить внимание в предыдущем разделе – это использование стандартов сжатия видео. Возникает вопрос: 4D-световые поля лучше сжимать в виде последовательности 2D-кадров или в виде многомерного тела? Поэтому мы измерили производительность всех вышеупомянутых стандартов сжатия видео. Результаты можно увидеть на рис. 7. На этот раз для краткости показаны результаты только для двух световых полей.

Интересно, что кодек XAVC действительно показал лучшую производительность сжатия, чем HEVC и AV1.

Чтобы ответить на вопрос: «Каков наилучший метод сжатия для данных световых полей?», было проведено дополнительное сравнение результатов с наиболее эффективными методами из эксперимента 1. Общее сравнение показано на рис. 8. Интересно, что методы сжатия видео работают лучше, чем все методы сжатия изображений, даже лучше, чем их расширения 3D и 4D.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью работы было проведение оценки существующих методов, подходящих для сжатия 4D-световых полей с потерями. Поскольку световое поле в исходном варианте представляет из себя набор изображений, запечатленных массивом камер, методы сжатия изображений станут первыми, из чего мы будем выбирать в задачах сжатия. Эксперимент показывает, что методы, обрабатывающие 4D-световые поля непосредственно в четырех или трех измерениях, позволяют достичь более высоких результатов сжатия, чем классические реализации сжатия двумерных изображений.

Однако стоит отметить, что на выбранный критерий оценивания, а именно PSNR, влияет не только размерность алгоритма сжатия, но также и расстояние базовой линии, так как разница между изображениями увеличивается в зависимости от расстояния между

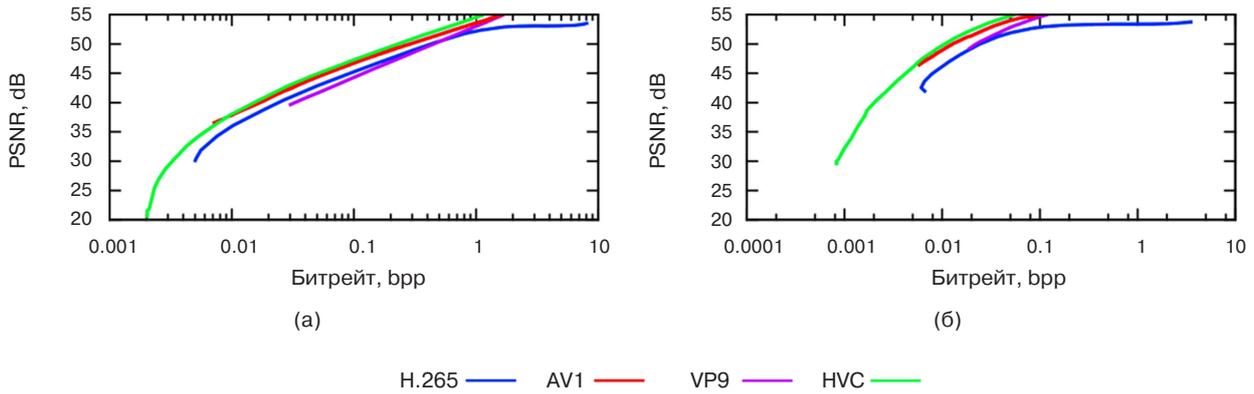


Рис. 7. Эксперимент 2. Сравнение производительности методов сжатия видео. Исползованные поля: (а) Danger de mort, (б) Chessboard

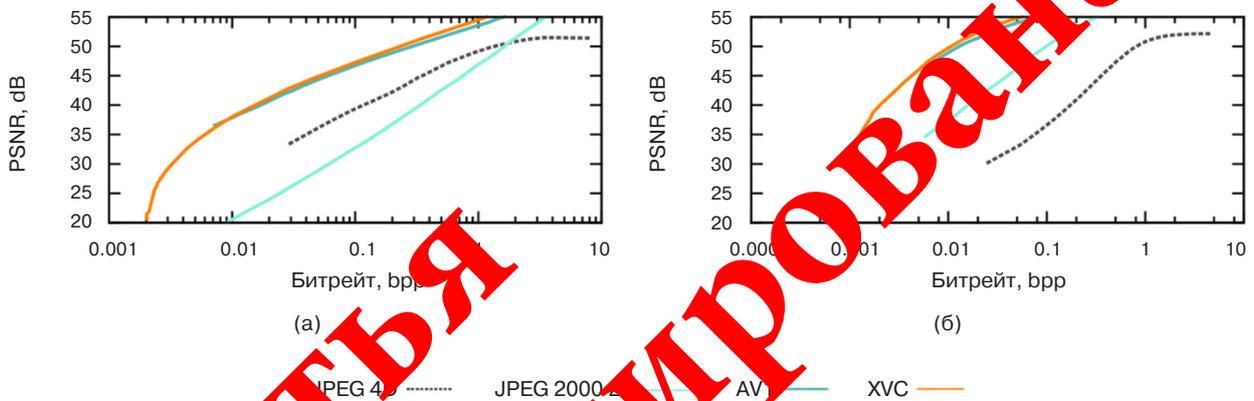


Рис. 8. Сравнение производительности методов сжатия видео по отношению к алгоритмам сжатия изображений. Исползованные поля: (а) Danger de mort, (б) Chessboard

оптическими центрами каждой матрицы камеры. Так для усвоения, состоящих из массива камер машинного зрения, находящихся на стойках и расположенных в помещении, очевидным выбором будет применение обычных методов сжатия изображений.

Кроме того, исходя из оценки производительности методов сжатия видео, можно заметить, что алгоритм XVC остается непревзойденным, хотя его результаты оказываются выше остальных. Следующим по значимости можно считать алгоритм AV1. Это подтверждает тот факт, что новейшие алгоритмы сжатия показывают более высокую производительность по отношению к своим предшественникам.

Также при небольшом расстоянии между оптическими центрами запечатленных изображений применение алгоритмов сжатия видео более предпочтительно, чем применение алгоритмов сжатия изображений, поскольку они показывают более высокие результаты как в трехмерном, так и в четырехмерном варианте.

Вклад авторов

Р.Г. Болбаков – идея, разработка дизайна исследования, консультация по вопросам проведения всех этапов исследования.

В.А. Мордвинов – анализ научной работы, критический пересмотр с внесением ценного интеллектуального содержания.

А.Д. Макаревич – анализ литературы, написание статьи, планирование исследования, проведение всех этапов исследования, формализация списка литературы.

Authors' contributions

R.G. Bolbakov – idea, development of research design, consultation on the problems of carrying out all stages of the study.

V.A. Mordvinov – analysis of scientific work, revision with the contribution of valuable intellectual content.

A.D. Makarevich – literature analysis, article writing, research planning, carrying out all stages of the study, formalization of the list of references.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Broxton M., Flynn J., Overbeck R., Erickson D., Hedman P., Matthew Duvall M., Dourgarian J., Busch J., Whalen M., Debevec P. Immersive light field video with a layered mesh representation. *ACM Trans. Graph.* 2020;39(4):86. <https://doi.org/10.1145/3386569.3392485>
2. Georgiev T., et al. Lytro camera technology: theory, algorithms, performance analysis. In: *Proc. SPIE. Multimedia Content and Mobile Devices.* 2013;8667:86671J. <https://doi.org/10.1117/12.2013581>

3. Adelson E.H., Bergen J.R. The plenoptic function and the elements of early vision. In: Landy M., Movshon J.A. (Eds.). *Computational Models of Visual Processing*. London: The MIT Press Cambridge; 1991. P. 3–20. <https://doi.org/10.7551/mitpress/2002.003.0004>
4. Alves G., Pereira F., da Silva E.A.B. Light field imaging coding: Performance assessment methodology and standards benchmarking. In: *2016 IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops (ICMEW)*. IEEE; 2016. C. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICMEW.2016.7574774>
5. Zabrovskiy A., Feldmann C., Timmerer C. Multi-codec DASH dataset. In: *Proceedings of the 9th ACM Multimedia Systems Conference*. 2018. P. 438–443. <https://doi.org/10.1145/3204949.3208140>
6. Samuelsson J. The XVC video code” a revolutionary software-defined video compression format. *SMPTE Motion Imaging Journal*. 2019;128(10):1–8. <https://doi.org/10.5594/JMI.2019.2937737>
7. Viola I., Řeřábek M., Ebrahimi T. Comparison and evaluation of light field image coding approaches. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2017;11(7):1092–1106. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2017.2740167>
8. Dlabaja D. 4D-DCT based light field image compression. *Image*. 2019;28(1):128. Available from URL: <http://www.vutbr.cz/submissions/2019/021/21.pdf>
9. Brites C., Ascenso J., Pereira F. Lenslet light field image coding: Classifying, reviewing and evaluating. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2020;31(1):339–354. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2020.2976784>
10. Aggoun A. A 3D DCT compression algorithm for omnidirectional integral images. In: *2006 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing Proceedings*. IEEE; 2006. P. 9142643. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2006.16903393>
11. Liu D., et al. View synthesis-based light field image compression using a generative adversarial network. *Inf. Sci.* 2021;545:118–131. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.07.073>
12. Pratapa S., Manocha D. RLFC: random access light field compression using key views and bounded integer sequence encoding. In: *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*. 2019. P. 1–10. <https://doi.org/10.1145/3306131.3317018>
13. Dib E., et al. Super-ray based low rank approximation for light field compression. In: *2019 Data Compression Conference (DCC)*. IEEE; 2019. P. 369–378. <https://doi.org/10.1109/DCC.2019.00045>
14. Joshitha R., Sharma M. A hierarchical coding scheme for glasses-free 3d displays based on scalable hybrid layered representation of real-world light fields. In: *2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. IEEE; 2021. P. 3491–3498. <https://doi.org/10.1109/SMC52220.2021.9658584>
15. Ravishankar J., Sharma M. A novel hierarchical light field coding scheme based on hybrid stacked multiplicative layers and Fourier diversity layers for glasses-free 3D displays. *arXiv preprint arXiv:2108.12399*. 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.12399>
16. Tu Y., et al. Efficient content adaptive plenoptic video coding. *IEEE Access*. 2020;8:5797–5804. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2964056>
17. Chao Y.H., et al. Pre-dmosaic graph-based light field image compression. *arXiv preprint arXiv:2102.07883*. 2021. Available from URL: <https://arxiv.org/pdf/2102.07883.pdf>
18. Mathew A.G., Mathew A.A. Intra coding of plenoptic images in HEVC. In: *Emerging Technologies for Sustainability*. CRC Press; 2020. P. 459–465. Available from URL: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780429353628-58/intra-coding-plenoptic-images-hevc-ashlin-george-mathew-anu-abraham-mathew>
19. Bakir N., et al. RDO-based light field image coding using convolutional neural networks and linear approximation. In: *2019 Data Compression Conference (DCC)*. IEEE; 2019. P. 554. <https://doi.org/10.1109/DCC.2019.00066>
20. Zhong T., et al. Light field image compression using depth-based CNN in intra prediction. In: *2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*. IEEE; 2019. P. 8564–8567. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2019.8682820>
21. Yuan X., Haimi-Cohen R. Image compression based on compressive sensing: End-to-end comparison with JPEG. *IEEE Transactions on Multimedia*. 2020;22(11):2889–2904. <https://doi.org/10.1109/TMM.2020.2967646>
22. Li Y., et al. Coding of focused plenoptic contents by displacement intra prediction. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2015;26(7):1308–1319. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2015.2450333>

Об авторах

Болбаков Роман Геннадьевич, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой инструментального и прикладного программного обеспечения Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bolbakov@mirea.ru. Scopus Author ID 57202836952, SPIN-код РИНЦ 4210-2560, <http://orcid.org/0000-0002-4922-7260>

Мордвинов Владимир Александрович, к.т.н., профессор кафедры инструментального и прикладного программного обеспечения Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: mordvinov@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 9390-1540, <http://orcid.org/0000-0003-3622-8448>

Макаревич Артём Денисович, аспирант кафедры инструментального и прикладного программного обеспечения Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: artemmakarevich1997@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-2211-1241>

About the authors

Roman G. Bolbakov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Instrumental and Applied Software, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bolbakov@mirea.ru. Scopus Author ID 57202836952, RSCI SPIN-code 4210-2560, <http://orcid.org/0000-0002-4922-7260>

Vladimir A. Mordvinov, Cand. Sci. (Eng.), Professor, Department of Instrumental and Applied Software, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: mordvinov@mirea.ru. RSCI SPIN-code 9390-1540, <http://orcid.org/0000-0003-3622-8448>

Artem D. Makarevich, Postgraduate Student, Department of Instrumental and Applied Software, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: artemmakarevich1997@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-2211-1241>

Статья
ретрагирована

УДК 004.023

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-18-26>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Проектирование модулей системной динамики в системах поддержки принятия решений

А.Б. Сорокин[@],
Л.М. Железняк,
Д.В. Супруненко,
В.В. Холмогоров

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. При проектировании моделей системной динамики базовым конструктом стадии проектирования является представление исследуемого процесса в терминах причинно-следственной связи, состоящей из петель положительной и отрицательной обратной связи. При построении модели динамической среды возникает ряд трудностей использования обратной связи. Настоящее исследование показывает возможность проектирования модулей системной динамики для систем поддержки принятия решений на основе ситуационно-деятельностного подхода. Предполагается восполнить нехватку знаний о моделях системной динамики концептуальной моделью акта деятельности, с помощью которой может реализоваться экспертная система на основе продукционных правил. Концептуальные модели при таком аспекте применяются к человеческим рассуждениям с привязкой к определенным видам деятельности. Целью работы является исследование возможности применения ситуационно-деятельностного подхода для проектирования моделей системной динамики инфекционных заболеваний на основе частных представлений разработанной концептуальной структуры акта деятельности.

Методы. На основе синтеза двух подходов – ситуационного, предложенного Л.С. Болотовой, и системно-деятельностного, предложенного Г.П. Щедровицким, представлена концептуальная структура акта деятельности как методика ситуационно-деятельностного подхода. Анализ данной структуры приводит к построению процессуального плана и плана аналитических закономерностей. Была проверена следующая гипотеза: процессные представления описывают нотацию потоков и уровней, а аналитические закономерности реализуют дифференциальные уравнения. Для доказательства гипотезы исследовалась предметная область инфекционных заболеваний.

Результаты. На совокупности данных планов синтезирован графический образ для построения моделей системной динамики, который идентичен диаграмме потоков и уровней развития SIR-процесса. Однако задачу построения концептуальных структур следует признать нетривиальной, сложной и трудоемкой. Поэтому реализован программный комплекс следующего состава: «Оформитель», «Решатель» и «Интерпретатор». Программный инструментарий позволил визуализировать концептуальные структуры и реализовать базы знаний для экспертных моделей системной динамики, а также провести исследования на полноту и адекватность модели.

Выводы. На сегодняшний день не существует единой концептуальной структуры для проектирования экспертных систем, ситуационных и имитационных динамических моделей. Предложенный в работе метод и программный инструментарий позволяет решить данные задачи на основе ситуационно-деятельностного метода. Таким образом, осуществляется взаимодействие различных видов деятельности в экспертных

системах, тем самым подтверждается достоверность знаний в моделях системной динамики. Концептуальные структуры акта деятельности являются ядерной частью при проектировании экспертных систем, а производные процессные и аналитические представления акта деятельности являются ядерной частью при разработке модулей системной динамики.

Ключевые слова: ситуационно-деятельностный подход, концептуальная структура акта деятельности, процессные представления, аналитические представления, модели системной динамики

• Поступила: 27.12.2021 • Доработана: 15.05.2022 • Принята к опубликованию: 20.06.2022

Для цитирования: Сорокин А.Б., Железняк Л.М., Супруненко Д.В., Холмогоров В.В. Проектирование модулей системной динамики в системах поддержки принятия решений. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):18–26. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-18-26>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Designing modules of system dynamics in decision support systems

Aleksey B. Sorokin[@],
Liliya M. Zheleznyak,
Dmitry V. Suprunenko,
Vladislav V. Kholmogorov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. When creating models of system dynamics, the basic construct at the design stage is the representation of the process under study in terms of a causal relationship consisting of a positive feedback loop and a negative feedback loop. The construction of a model of a dynamic environment can experience a number of difficulties in using feedback. This work shows the possibility of designing modules of system dynamics for decision-making systems based on the situational-activity approach. The study proposes the gap in knowledge about models of system dynamics to be filled with a conceptual model of an act of activity, by means of which an expert system can be implemented based on production rules. In this context, conceptual models are applied to human reasoning with reference to certain types of activity. The objective of the study was to investigate the possibility of applying the situational-active approach to designing models of system dynamics of infectious diseases based on particular representations of the conceptual structure of the act of activity.

Methods. By synthesizing Bolotova's situational algorithm and Shchedrovitskiy's system-activity approach, the conceptual structure of the act of activity is presented as a methodology of the situational-activity approach. The analysis of this structure leads to the construction of a plan of processual structure and a plan of analytical relationships. The article proposed a hypothesis that the process representations describe the notation of flows and levels, and the analytical relationships implement differential equations. In order to prove this hypothesis, the subject area of infectious diseases was investigated.

Results. Based on the set of these plans, a graphic image was synthesized for constructing models of system dynamics, which is identical to the diagram of flows and levels of development of the SIR process. However, the problem of constructing conceptual structures is nontrivial, complex, and laborious. Therefore, the Designer–Solver–Interpreter software suite was implemented. The software tools enable a visualization of the conceptual structures and implementation of the knowledge bases for expert models of system dynamics. It also tests the completeness and viability of the model.

Conclusions. To date, there is no single conceptual structure for designing expert systems and situational and simulation dynamic models. The proposed method and software tools allow these problems to be resolved using the situational-activity method. Various types of dynamics in expert systems interact, thus confirming the reliability of knowledge in the models of system dynamics. The conceptual structures of the act of activity are the core part of designing expert systems, while the derivative process and analytical representations of the act of activity are the core part of developing modules of system dynamics.

Keywords: situational-activity approach, conceptual structure of an act of activity, process representations, analytical representations, models of system dynamics

• Submitted: 27.12.2021 • Revised: 15.05.2022 • Accepted: 20.06.2022

For citation: Sorokin A.B., Zheleznyak L.M., Suprunenko D.V., Kholmogorov V.V. Designing modules of system dynamics in decision support systems. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):18–26. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-18-26>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

От достоверности и полноты данных зависит ценность принимаемых решений. При этом деятельность в среде, обусловленной высокой динамичностью, активна и предрасположена к самостоятельному выбору собственного состояния. Акты деятельности также формируют свои требования к системе принятия решений. Объекты актов деятельности в ситуациях динамически изменяющейся среды и необходимости принятия управленческого решения обусловлены своими состояниями, которые определены с точки зрения целеполагания субъекта управления. Если в системе присутствует достаточное множество действий, несущих управляющий характер, то возникает неопределенность в динамике процессов, что способствует упрощенному восприятию действительности и эмоциональному решению сложной задачи управления [1]. Возникает ситуация невозможности выявления последовательности и закономерности действий принимаемых решений. Следовательно, необходимо определить гипотезу поведения сложного объекта при множественности управляющих воздействий и на этом основании имитировать процесс изменения объекта с различными вариантами решений [2].

Имитационная модель (ИМ) определена логико-алгоритмическим описанием поведения сложного объекта и оперирует непрерывными и дискретными состояниями. Дискретная модель основывается на обычных функциональных блоках, она определена средним уровнем абстракции и реализуется на основании методологии структурного подхода (англ. structured analysis and design technique, SADT)

или методологии функционального моделирования (англ. function modeling, IDEF0). Непрерывное моделирование поддерживает все уровни абстракции и определено унифицированным языком моделирования (англ. unified modeling language, UML), главным образом диаграммами состояний и деятельности.

В ИМ присутствует направление высокого уровня абстракции, называемое системной динамикой. Процессы реального мира в системной динамике представлены в терминах информации, потоков между уровнями и накопителями, а их формальная основа – в виде уравнений темпа потока, использующих динамические процессы пространства состояний. Идея изменений посредством «петель обратных связей» является одной из важнейших в установлении структуры системной динамики. Это привело к созданию инструментов реализации диаграмм причинно-следственных связей (ПСС) с учетом обратных связей. Получаемая в процессе моделирования графическая модель, по сути, является диаграммой связей, отражающей отношения между элементами моделируемой системы как ПСС. Если изменение причины влечет за собой аналогичное изменение следствия, то такую связь называют положительной, если же при изменении причины происходит противоположное изменение следствия, то связь называют отрицательной, поэтому правильность модели главным образом зависит от верного определения роли ПСС. Этот процесс без концептуального исследования представляется трудоемким [3].

В экспертных и ситуационных системах модели представления знаний являются аналогичными. Частым инструментом ситуационного моделирования являются имитационные модели, из чего

следует, что язык ситуационного проектирования должен включать в себя определенные инструменты языков моделирования.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭТАПА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ

В моделях системной динамики рассматривают две основные стадии. Первая из них называется «качественной», при ее реализации учитываются взаимосвязи элементов системы, а также структура самой проблемы. Здесь основополагающей конструкцией системы выступает диаграмма процесса, состоящая из положительной («+»), и отрицательной («-») обратных связей с соответствующим обозначением их полярностей (рис. 1).

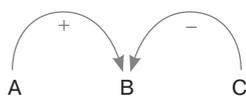


Рис. 1. Полярности связей

Вторая стадия называется «количественной». При ее реализации проводится проверка правильности и достоверности модели, а также проверка сценариев поведения системы при различных условиях [4].

Если две отрицательные связи соединены последовательно, то они образуют положительную связь. В свою очередь связи причинно-следственного типа способны образовать контур, являющийся однонаправленным и замкнутым. Он может быть либо положительной обратной связью (ПОС), либо отрицательной обратной связью (ООС).

Правила определения полярности контура связи в обобщенном виде говорят о том, что отсутствие или четное количество ПСС в нем делает его контуром ПОС, а нечетное число отрицательных ПСС – контуром ООС.

Из-за динамического характера моделируемой среды могут возникать сложности. Так, например, если система достаточно сложная, то возможно существование одновременно множества как ПОС, так и ООС, а сами причины динамических изменений среды могут быть сложно достижимы в модели. Также стоит отметить, что детерминировать необходимо лишь те ПСС, которые понятны без каких-либо дополнительных действий. Важную роль играет и объективизация обратных связей, неверно отражающих объективную реальность задачи [5].

ПСС модели позволяют определить количественный этап моделирования динамической системы, что делает их основным инструментом проектирования потоков и уровней систем. Ее элементарными единицами являются уровни, решения (функционального

типа), потоки информации, а также материальные движения (рис. 2).

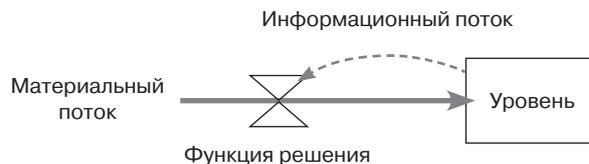


Рис. 2. Структура количественной стадии

Уровни имеют четкую зависимость от времени и обозначают некую переменную (в конкретный момент), при этом их содержимое может быть совершенно разнородным. Математически значение уровня в определенный момент времени равно сумме значения уровня в предыдущий момент времени и произведения скорости изменения значения уровня к приращению времени. Сама скорость изменения значения уровня представляет собой разность между скоростью входящего и выходящего потоков. Модель уровней представлена на рис. 3.

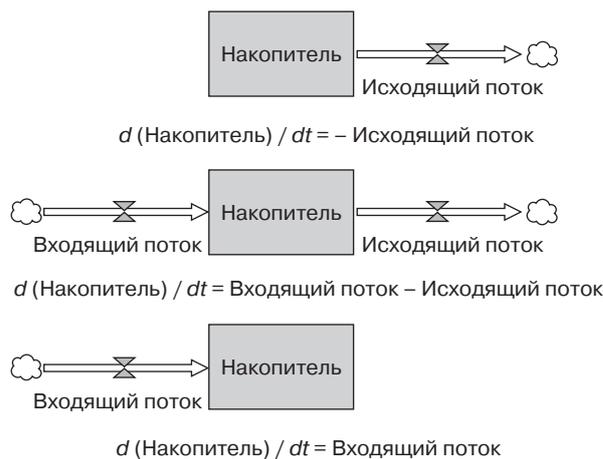


Рис. 3. Имитационная динамическая модель уровней

Если уравнения уровней позволяют определить значение какого-либо уровня в настоящий момент времени на основе его значения в предыдущий момент, то уравнения темпов имеют прогнозирующий характер, т.е. позволяют предсказать значения в следующий момент времени [6].

В задаче прогнозирования темпов важно смотреть не только на прямые, но и на косвенные факторы влияния, например, на время, а также на поток информации.

Для получения результатов из пространства решений может быть достаточно одного эксперимента, однако полномасштабное исследование окружения требует проведения некоторого набора экспериментов, в результате чего может быть обеспечена вариативность решений для лица, принимающего решения.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ НА ОСНОВЕ СИТУАЦИОННО-ДЕЯТЕЛЬНОСТНОГО ПОДХОДА

Согласно методике ситуационно-деятельностного подхода необходимо выделить виды деятельности, которые существуют в сложной динамической среде, тем самым определяется граница действительности выбранной предметной области. Представим, например, динамически сложную среду «Противодействие развитию инфекционных заболеваний», в которой существует множество видов деятельности (рис. 4) [7].

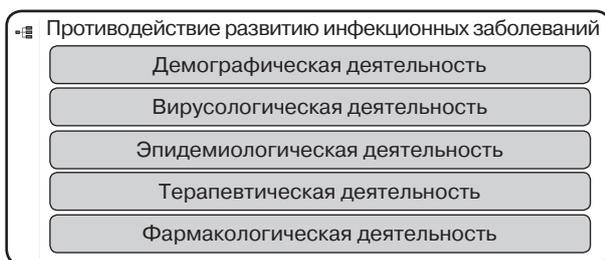


Рис. 4. Множество видов деятельности в динамической среде

Структурирование деятельности позволяет выявить ее определенные виды, что, в свою очередь, дает возможность посредством логического (формального) анализа перейти к другой деятельности в рамках выделенного вида. В созданной структуре основополагающей единицей будет акт деятельности, что не ограничивает исследователя в рамках выявления любых других единиц, зависящих от постановки целей и задач [8, 9].

Из концептуальных структур актов деятельности выделяются четыре разных содержания акта деятельности: план функциональной структуры, план процессуальной структуры, план контекста и план аналитических закономерностей [10]. Эти планы выражены в одной структуре, которая объединяет их в единое целое, что не только не создает противоречий,

но и позволяет применять их как параллельно, так и последовательно [11, 12]. В связи с вышеизложенным, основным предметом исследования настоящей статьи является план процессов и закономерностей динамической имитационной модели.

Планирование процессов обусловлено самими процессами, участвующими в них объектами, состояниями этих объектов и средствами, благодаря которым система достигает своего целевого состояния [13].

Планирование закономерностей обусловлено как множеством объектов и отношений между ними, так и свойствами объектов и соотношений между ними (рис. 5).

Реализация плана закономерностей определена следующими правилами:

- состояние объекта действия равно продукту (продукционному элементу), выраженному количественной оценкой, и ассоциируется с решением;
- свойства средств действий равны количественной оценке и ассоциированы с параметрами, определенными в структуре уравнений;
- отношения должны быть однонаправленными, а отношения типа « $a > b$ на x », « $a < b$ на x », « $a > b$ в x », « $a < b$ в x », где x – действительное число большее единицы; a и b – некоторые признаки сравнения объектов или отношений объектов предметной области, должны обозначаться с помощью соответствующих арифметических операций;
- объекты закономерностей типа «увеличить» должны обозначаться знаком плюс, типа «уменьшить» – знаком минус, «определить» – с помощью знака равенства.

Разнообразие представлений очередности арифметических операций в моделях системной динамики формируется благодаря плану определения закономерностей для дальнейшего его применения в дифференциальных уравнениях соответствующих моделей.

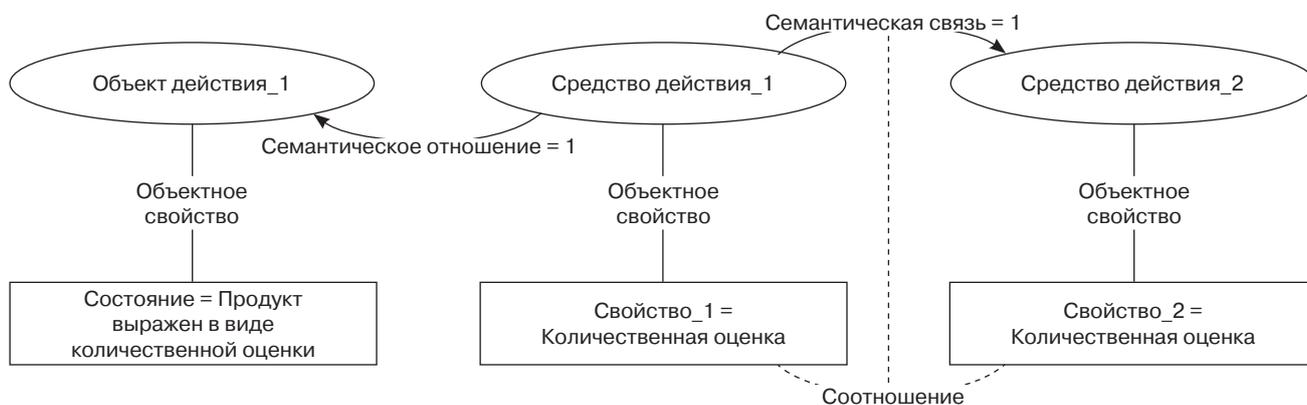


Рис. 5. Структура плана закономерностей

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Концептуальное моделирование предметной области (ПрО) требует от специалиста понимания методик анализа ситуаций, деятельности и процессов, протекающих в конкретной ПрО [14]. В частности, возникает спектр задач, выполнение которых возможно только с помощью программного средства, которое бы могло:

- 1) отображать концепты (как элементы знаковых систем);
- 2) проверять полноту и непротиворечивость систем;
- 3) генерировать базы знаний.

В рамках выполнения первой задачи авторами настоящей статьи было разработано приложение «Оформитель», которое выполняет следующие задачи [15]:

- создание объектов на основе стандартных геометрических фигур (примитивов);
- реализация связей между объектами;
- редактирование текста элементов модели;
- масштабирование модели.

Задачи 2 и 3 решаются посредством приложения «Малый Решатель Проблем» (МРП), разработанного специально для ситуационного анализа. МРП поддерживает следующие функции [15]:

- создание, хранение, изменение и тестирование модели, а также проверка корректности продукционных баз знаний (БЗ), состоящих из рабочей базы данных (РБД) и базы правил (БП);
- логический вывод;
- формирование отчетности об анализе проблемных и о достижении целевых ситуаций.

Функциональность МРП обусловлена его архитектурой (рис. 6).

Таким образом, можно определить следующую последовательность в работе комплекса «Оформитель + Решатель + Интерпретатор» (ОРИ): при сохранении файла в программе «Оформитель» создается XML-файл с разметкой графической модели, после чего этот файл открывается при помощи МРП и программа посредством своего программного интерфейса (англ. application programming interface, API) считывает информацию из файла и записывает ее в свою базу знаний, проверяет модель на наличие синтаксических ошибок и информирует пользователя о результате загрузки. Далее идет проверка базы знаний на полноту и непротиворечивость. В редакторах объектов, отношений, решения конфликтных ситуаций и целевой ситуации устанавливаются начальные значения, после чего в разделе «Описание/Анализ» происходит проверка ситуации.

База знаний состоит из РБД и БП, в которых содержатся элементы модели, имена правил и продукции.

Продукции имеют левую часть (предусловие) – совокупность значений свойств и отношений, необходимых для активизации правила, а также правую часть (постусловие) – совокупность значений свойств и отношений, которые эти свойства и отношения получают после выполнения правила.

По своей сути «Интерпретатор» является API-рецептором для восприятия и транслирования XML-файлов графической модели концепции предметной области. В его структуре заложены:

- парсер, который ищет в XML-разметке данные по определенным указателям (тегам);
- лексер, который переводит данные, находящиеся на местах, определенных тегами, в вид, понятный МРП.

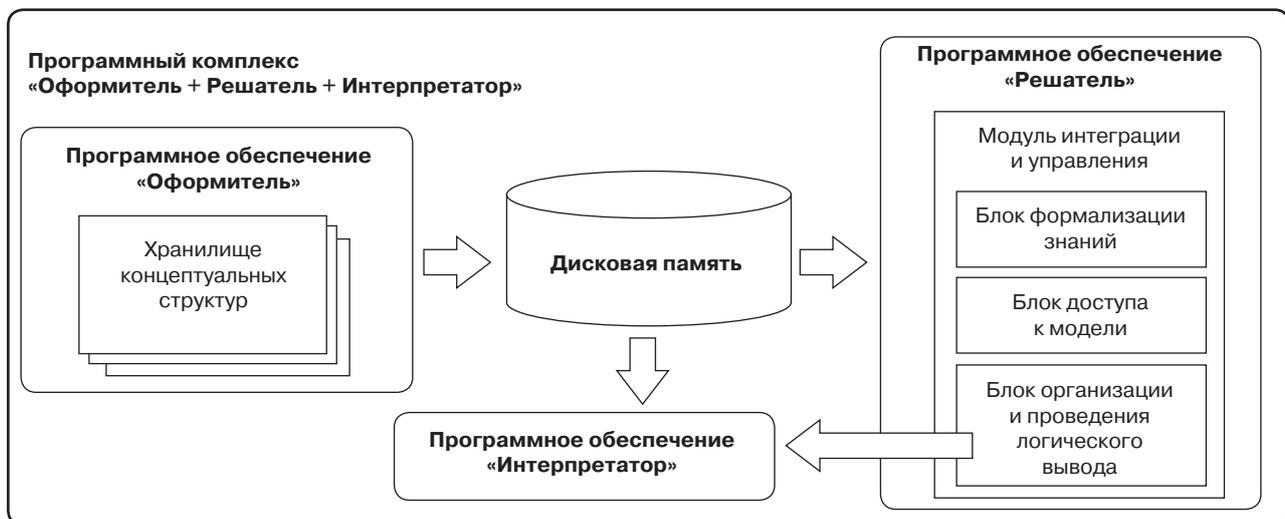


Рис. 6. Комплекс «Оформитель + Решатель + Интерпретатор» и архитектура МРП

По окончании преобразования и передачи лексегом данных начинается основной этап работы МРП. После определения начальных условий свойств объектов и отношений, начальной ситуации и стратегий управления конфликтными ситуациями реализуется логический вывод из БП в соответствии с продукционными правилами. Отчет, получаемый в результате работы МРП, позволяет понять исследователю степень правильности построенной им концептуальной модели предметной области, т.к. МРП, помимо возможности создать базовую начальную ситуацию, позволяет модифицировать ее изменением начальных и добавлением дополнительных объектов, свойств, отношений и правил.

В случае возникновения конфликтных ситуаций в моделируемой системе либо, если эти конфликты были предусмотрены исследователем, существует два основных способа их разрешения [16]:

- определение приоритетов продукционным правилам в редакторе управления правилами с последующим определением стратегии разрешения конфликтных ситуаций «по наивысшему приоритету»;
- определение иных стратегий управления конфликтными ситуациями, кроме определения приоритета, например, «приближающее к цели», «не создающий циклов» и т.п.

Оптимальным решением для конфликтов, связанных с преднамеренным их созданием при проектировании концептуальной модели, является установка приоритетов. Наивысший приоритет должен быть определен правилом, которое связано с наиболее важным фактором, например, с человеческой жизнью. Если же конфликты связаны с ошибками, допущенными на этапе проектирования, то пользователь МРП может вручную изменить продукции в редакторе правил, предусмотрев возможные ветвления при выполнении модели в условиях измененных начальных условий.

В целом рекомендуется проверять как минимум три следующие проблемные ситуации:

- 1) все условия проблемной ситуации должны соответствовать изначальной логике графической модели (не производится каких-либо изменений начальных условий);
- 2) для одного или нескольких ключевых свойств, значения которых изменяются в процессе действий модели, должны быть установлены значения, к которым они должны прийти в процессе работы (изменения состояний в соответствии с БЗ) модели, и таким образом проверить, сходится ли результат работы МРП с логикой (которую предполагал исследователь) работы модели;
- 3) для одного (или нескольких) свойств должны быть установлены такие значения, при которых логика модели нарушается либо не работает

совсем. Тем самым появляется возможность проверки корректности модели при невыполнимых и противоречивых условиях.

Таким образом, основными целями программного комплекса «ОРИ» являются [16]:

- построение концептуальной модели предметной области рассматриваемой исследователем задачи;
- перенос модели из графической модели в программную, общую для большинства актуальных приложений;
- анализ программной модели с точки зрения возможных проблемных ситуаций посредством формальной теории.

Если обобщить все вышесказанное, то «ОРИ» позволяет исследователю создать концептуальную модель изучаемой им предметной области и понять, насколько она верна и полна, т.е. работает ли логика, заложенная в модель, с точки зрения логики программ (и с точки зрения формальной теории) и предусматривает ли модель всевозможные ситуации и их последствия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт и практика создания систем поддержки принятия решений (СППР) показывают, что на данный момент не существует единой концептуальной структуры базы знаний для реализации интеллектуальных модулей, а также программного обеспечения, поддерживающего ситуационно-деятельностный подход. Отсутствие подобной единой структуры указывает, что в настоящее время в области поддержки принятия решений существует как минимум одна проблема. Ситуационно-деятельностный подход делает возможным эффективное исследование сложных с точки зрения динамики систем на предмет создания имитационных моделей, моделей экспертных систем, а также иных интеллектуальных систем СППР¹.

Множество концептуальных структур определено как некий элементный состав, на синтезе которого могут быть построены интеллектуальные СППР. Исходя из того, что познание сложной динамической среды на основании концептуальных структур ситуационно-деятельностного подхода является базисом при проектировании интеллектуальных модулей, предлагается несколько направлений его развития: в качестве языка осмысления и моделирования, а также как инструментальное средство выявления базы знаний.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

¹ Болотова Л.С. *Системы поддержки принятия решений*. В 2 ч. Часть 1: учебник и практикум для академического бакалавриата. М.: Юрайт; 2019. 257 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brehmer B. Dynamic decision making: Human control of complex systems. *Acta Psychol. (Amst.)*. 1992;81(3): 211–241. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(92\)90019-A](https://doi.org/10.1016/0001-6918(92)90019-A)
2. Андрианова Е.Г., Головин С.А., Зыков С.В., Лесько С.А., Чукалина Е.Р. Обзор современных моделей и методов анализа временных рядов динамики процессов в социальных, экономических и социотехнических системах. *Российский технологический журнал*. 2020;8(4):7–45. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-7-45>
3. Ярыгин О.Н., Коростелев А.А. Системная динамика как основа современной управленческой компетентности. *Актуальные проблемы экономики и права*. 2014;4:196–205.
4. Forrester J.W. Information sources for modeling the national economy. *Journal of the American Statistical Association*, 1980;75(371):555–574. <https://doi.org/10.2307/2287647>
5. Sterman J.D. All models are wrong: reflections on becoming a systems scientist. *System Dynamics Review*. 2002;18(4):501–531. <https://doi.org/10.1002/sdr.261>
6. Gonzalez C. Learning to make decisions in dynamic environments: Effects of time constraints and cognitive abilities. *Hum. Factors*. 2004;46(3):449–460. <https://doi.org/10.1518/hfes.46.3.449.50395>
7. Nakamura G.M., Cardoso G.C., Martinez A.S. Improved susceptible–infectious–susceptible epidemic equations based on uncertainties and autocorrelation functions. *R. Soc. Open Sci.* 2020;7(2):191504. <https://doi.org/10.1098/rsos.191504>
8. Гаврилова Т.А. Онтологический подход к управлению знаниями при разработке корпоративных систем автоматизации. *Новости искусственного интеллекта*. 2003;2:24–30.
9. Верхотурова Ю.С. Модель предметной области на языке описания онтологий. *Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика*. 2013;9:63–68.
10. Щедровицкий Г.П. Методологический смысл оппозиции натуралистического и системоделятельного подходов. *Вопросы методологии*. 1991;2:143–154.
11. Rodrigues da Silva A. Model-driven engineering: A survey supported by the unified conceptual model. *Comput. Lang. Syst. Struct.* 2015;43:139–155. <https://doi.org/10.1016/j.cl.2015.06.001>
12. Ganter B., Obiedkov S. *Conceptual exploration*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2016. 315 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49291-8>
13. Tan R.P., Zhang W.D., Chen S.Q., Yang L.H. Emergency decision-making method based on case-based reasoning in heterogeneous information environment. *Control and Decision*. 2020;35(8):1966–1976.
14. Chen D.-Y., Zhao H., Zhang X. Semantic mapping methods between expert view and ontology view. *J. Softw.* 2020;31(9):2855–2882.
15. Сорокин А.Б., Смольянинова В.А. Концептуальное проектирование экспертных систем поддержки принятия решений. *Информационные технологии*. 2017;23(9):634–641.

REFERENCES

1. Brehmer B. Dynamic decision making: Human control of complex systems. *Acta Psychol. (Amst.)*. 1992;81(3): 211–241. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(92\)90019-A](https://doi.org/10.1016/0001-6918(92)90019-A)
2. Andrianova E.G., Golovin S.A., Zyko S.V., Lesko S.A., Chukalina E.R. Review of modern models and methods of analysis of time series of dynamics of processes in social, economic and socio-technical systems. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(4):7–45 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-7-45>
3. Yarygin O.N., Korostelev A.A. Systemic dynamics as the basis of modern managerial competence. *Aktual'nye problemy ekonomiki i prava = Actual Problems of Economics and Law*. 2014;4:196–205 (in Russ.).
4. Forrester J.W. Information sources for modeling the national economy. *Journal of the American Statistical Association*, 1980;75(371):555–574. <https://doi.org/10.2307/2287647>
5. Sterman J.D. All models are wrong: reflections on becoming a systems scientist. *System Dynamics Review*. 2002;18(4):501–531. <https://doi.org/10.1002/sdr.261>
6. Gonzalez C. Learning to make decisions in dynamic environments: Effects of time constraints and cognitive abilities. *Hum. Factors*. 2004;46(3):449–460. <https://doi.org/10.1518/hfes.46.3.449.50395>
7. Nakamura G.M., Cardoso G.C., Martinez A.S. Improved susceptible–infectious–susceptible epidemic equations based on uncertainties and autocorrelation functions. *R. Soc. Open Sci.* 2020;7(2):191504. <https://doi.org/10.1098/rsos.191504>
8. Gavrilova T.A. Ontological approach to knowledge management in the development of corporate automation systems. *Novosti iskusstvennogo intellekta = News of Artificial Intelligence*. 2003;2:24–30 (in Russ.).
9. Verkhoturva Yu.S. Model of the subject domain in the language of ontology description. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika, informatika = BSU Bulletin. Mathematics, Informatics*. 2013;9:63–68 (in Russ.).
10. Shchedrovitskii G.P. The methodological meaning of the opposition of the naturalistic and system-activity approach. *Voprosy metodologii*. 1991;2:143–154 (in Russ.).
11. Rodrigues da Silva A. Model-driven engineering: A survey supported by the unified conceptual model. *Comput. Lang. Syst. Struct.* 2015;43:139–155. <https://doi.org/10.1016/j.cl.2015.06.001>
12. Ganter B., Obiedkov S. *Conceptual exploration*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2016. 315 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49291-8>
13. Tan R.P., Zhang W.D., Chen S.Q., Yang L.H. Emergency decision-making method based on case-based reasoning in heterogeneous information environment. *Control and Decision*. 2020;35(8):1966–1976.
14. Chen D.-Y., Zhao H., Zhang X. Semantic mapping methods between expert view and ontology view. *J. Softw.* 2020;31(9):2855–2882.
15. Sorokin A.B., Smol'yaninova V.A. Conceptual design of expert systems of support of decision. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technologies*. 2017;23(9): 634–641 (in Russ.).

16. Sorokin A.B., Brazhnikova E.V., Zheleznyak L.M. Designing a knowledge base for the development of intelligent models based on the conceptual structure of activity act. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020;1615:012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1615/1/012023>
16. Sorokin A.B., Brazhnikova E.V., Zheleznyak L.M. Designing a knowledge base for the development of intelligent models based on the conceptual structure of activity act. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020;1615:012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1615/1/012023>

Об авторах

Сорокин Алексей Борисович, к.т.н., доцент, доцент кафедры вычислительной техники Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sorokin_a@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 1731-3838, <http://orcid.org/0000-0002-7230-6266>

Железняк Лилия Михайловна, старший преподаватель кафедры вычислительной техники Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: zheleznyak@mirea.ru. <http://orcid.org/0000-0002-8204-639X>

Супруненко Дмитрий Викторович, старший преподаватель кафедры вычислительной техники Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: suprunenko@mirea.ru. <http://orcid.org/0000-0002-2328-8604>

Холмогоров Владислав Владиславович, ассистент кафедры вычислительной техники Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: Hvv13@mail.ru. <http://orcid.org/0000-0002-5309-2661>

About the authors

Aleksey B. Sorokin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Computer Technology Department, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sorokin_a@mirea.ru. RSCI SPIN-code 1731-3838, <http://orcid.org/0000-0002-7230-6266>

Liliya M. Zheleznyak, Senior Lecturer, Computer Technology Department, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: zheleznyak@mirea.ru. <http://orcid.org/0000-0002-8204-639X>

Dmitry V. Suprunenko, Senior Lecturer, Computer Technology Department, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: suprunenko@mirea.ru. <http://orcid.org/0000-0002-2328-8604>

Vladislav V. Kholmogorov, Assistant, Computer Technology Department, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: Hvv13@mail.ru. <http://orcid.org/0000-0002-5309-2661>

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.372.22
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-27-37>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Модульная многопозиционная когерентная цифровая радиофотонная система

И.В. Унченко^{1, 2, 3, @},
А.А. Емельянов^{1, 2, 3}

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт, Калужская область,
г. Жуков, 249192 Россия

³ Технологии аппаратных решений, Калужская область, г. Малоярославец, 249096 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: unchenkoivan@gmail.com

Резюме

Цели. Разработка межвидовых и межклассовых способов построения радиотехнических когерентных систем на основе модульной дополняемой структуры.

Методы. В качестве базового набора для построения тракта цифровой радиофотонной системы предлагается рассмотреть комплекс модулей и субмодулей, не имеющих узкой специализации и в совокупности составляющих широкополосную гибкую аппаратно-реконфигурируемую программно-определяемую радиотехническую структуру. Благодаря широкополосности и дополняемой структуре модули и субмодули имеют множество применений, как в качестве самостоятельных устройств, так и в составе более сложных систем.

Результаты. Представлены функциональные схемы современных цифровых приемников-формирователей, модулей усиления радиочастотных сигналов, модулей преобразования радиочастотных сигналов в оптический сигнал, радиофотонной синхросети формирования тактовых сигналов. Приведены расчеты вносимой фазовой ошибки кварцевого одномодового волокна и графики зависимости изменения фазы сигнала от внешних воздействующих факторов. Предложена концепция интеграции представленных модулей и построения модульной приемно-передающей многопозиционной широкополосной когерентной цифровой радиофотонной системы. Приведены расчеты диаграмм направленности и результаты математического моделирования отклонения луча широкополосной антенной линейки. Показаны антенные системы на ее основе.

Выводы. Предложенные методы позволят существенно сократить сроки разработки новых типов систем за счет линейки готовых технических решений. Разработанные устройства обладают параметрами, не уступающими лучшим мировым аналогам, а в рамках интеграции в систему позволяют превзойти существующие решения. Апробирование разработок проведено в рамках НИОКР на базе АО «Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт» и ООО «Технологии аппаратных решений». Предложенные решения интегрированы на уровне подсистем в перспективные разработки продукции гражданского и специального назначения. Дальнейшее развитие концепции построения сверхширокополосных устройств позволит достигнуть нового уровня в технологии построения модульных многопозиционных когерентных цифровых радиофотонных систем.

Ключевые слова: цифровые антенные решетки, радар, активная фазированная антенная решетка, лазер, фотодиод, цифроаналоговый преобразователь, аналогово-цифровой преобразователь, цифровое диаграммообразование

• Поступила: 17.01.2022 • Доработана: 17.05.2022 • Принята к опубликованию: 24.06.2022

Для цитирования: Унченко И.В., Емельянов А.А. Модульная многопозиционная когерентная цифровая радио-фотонная система. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):27–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-27-37>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Photonics-based modular multistate digital coherent system

Ivan V. Unchenko ^{1, 2, 3, @},
Andrey A. Emelyanov ^{1, 2, 3}

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Kaluga Research Institute of Radio Engineering, Kaluga oblast, Zhukov, 249192 Russia

³ Hardware Solutions Technologies, Kaluga oblast, Maloyaroslavets, 249096 Russia

@ Corresponding author, e-mail: unchenkoivan@gmail.com

Abstract

Objectives. The study aimed to develop interspecies and interclass methods for constructing coherent radio engineering systems based on a modular complementary structure.

Methods. A set of modules and submodules having no narrow specialization and together constituting a flexible broadband hardware-reconfigurable software-defined radio engineering structure is considered as the basic set for constructing a digital radio photonic system path. Due to their broadbandness and complementary structure, modules and submodules have many applications both as self-sustained devices and as part of more complex systems.

Results. Functional diagrams of modern digital receiver-shapers, as well as modules for amplifying radio frequency signals and converting radio frequency signals into an optical signal are presented along with a radio photonic synchronization network for generating clock signals. Calculations of the introduced phase error of a quartz single-mode fiber and graphs of the dependence of the change in the signal phase on external influencing factors are given. A concept for integrating the presented modules into the construction of a modular transceiver multiposition wideband coherent digital radio photonic system is proposed. The results of calculating radiation patterns and mathematical modeling the beam deflection of a broadband antenna array are presented along with antenna systems based thereon.

Conclusions. The proposed circuit design solutions allow the time required for developing new types of systems to be significantly reduced due to the range of ready-made technical solutions. Not only are the parameters of the developed devices comparable to the best world analogues, but they also surpass existing solutions in terms of system integration. The developments have been tested under R&D project at the Kaluga Scientific Research Institute of Radio Technology and Hardware Solution Technologies (TAR). The proposed solutions are integrated at the subsystem level into advanced developments of products for civil and special purpose. Further development of the concept of building ultra-wideband devices allows reaching a new level in the technology of constructing modular multiposition coherent digital radio photonic systems.

Keywords: digital antenna arrays, radar, active phased antenna array, laser, photodiode, digital-to-analog converter, analog-to-digital converter, digital beamforming

• Submitted: 17.01.2022 • Revised: 17.05.2022 • Accepted: 24.06.2022

For citation: Unchenko I.V., Emelyanov A.A. Photonics based modular multistate digital coherent system. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):27–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-27-37>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время цифровые антенные решетки (ЦАР), широко распространенные в системах связи, находят все большее применение в радиолокационных системах (РЛС), в системах гражданского и специального назначения. Постоянное повышение рабочих частот и расширение полосы частот современных систем связи и РЛС, а также общие тенденции развития электроники и компонентной базы приводят к вытеснению традиционных активных фазированных антенных решеток (АФАР). На сегодняшний день на рынке представлены аналогово-цифровые преобразователи (АЦП) и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), позволяющие вести прямое цифровое диаграммоформирование (ЦДФ) в широкой полосе частот, а волоконно-оптические линии переноса частот дают возможность переносить синтезированные сигналы в любой участок спектра [1, 2]. Работы [3–9] посвящены дальнейшему развитию концепции построения сверхширокополосных устройств.

Цель настоящего исследования – разработать межвидовые и межклассовые способы построения радиотехнических когерентных систем на основе модульной дополняемой структуры, что позволит достигнуть нового уровня в технологии построения модульных многопозиционных когерентных цифровых радиофотонных систем.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ СОСТАВ ТРАКТА ЦИФРОВОЙ РАДИОФОТОННОЙ СИСТЕМЫ

В качестве интегрируемого тракта цифровой радиофотонной системы предлагается рассмотреть комплекс модулей и субмодулей, не имеющих узкой специализации и в совокупности составляющих широкополосную гибкую аппаратно-реконфигурируемую программно-определяемую радиотехническую структуру. Благодаря широкополосности и дополняемой структуре модули и субмодули имеют множество применений, как в качестве самостоятельных устройств, так и в составе более сложных систем.

В состав такой системы предлагается включить следующие компоненты: базовый цифровой модуль (БЦМ), субмодуль прямого усиления

радиочастотного сигнала (СУРС), субмодуль оптоэлектронного переноса частот (СОПЧ), вспомогательный модуль управления и питания субмодулей, радиофотонную синхросеть (РФС), фазированные широкополосные антенные решетки.

БЦМ предназначен для цифровой обработки и синтеза радиочастотных (РЧ) сигналов в широком диапазоне частот. Он является самостоятельным приемопередающим устройством. Расширить функционал БЦМ можно с помощью установки дополнительных субмодулей. В общем случае в состав предлагается включить двухканальные АЦП и ЦАП, программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС), цифровой сигнальный процессор (ЦСП), малошумящие усилители (У), управляемые аттенюаторы (Ат), набор переключателей (П), полосовых фильтров (ПФ) и схему квадратурной обработки входного сигнала спаренными АЦП, содержащую переключатели и направленные делители (Д). Структурная схема такого БЦМ представлена на рис. 1.

СУРС предназначен для усиления принимаемых и передаваемых сигналов, коммутации антенных входов на прием-передачу. На рис. 2 представлена структурная схема субмодуля.

СУРС состоит из приемных и передающих трактов. Для проведения самоконтроля в рамках системы используются коммутируемый тракт контрольного сигнала и каналы передатчика с интегрированными направленными ответвителями. Функционально СУРС состоит из направленных делителей, направленных ответвителей, управляемых аттенюаторов, малошумящих усилителей, каскадов усилителей мощности, переключателей и ограничителей (ОГР). Предлагается устанавливать СУРС на несущую печатную плату БЦМ, где организована стандартизированная схема питания субмодулей и канал информационного обмена (КИО) со сквозным протоколом управления и инициализации субмодулей.

СОПЧ – четырехканальный двунаправленный (2×2) субмодуль оптоэлектронного и электрооптического преобразования частот широкополосных сигналов, синтезируемых и оцифровываемых приемопередающими каналами модуля БЦМ. Предлагается парное использование разнесенных модулей СОПЧ. Функционально приемный

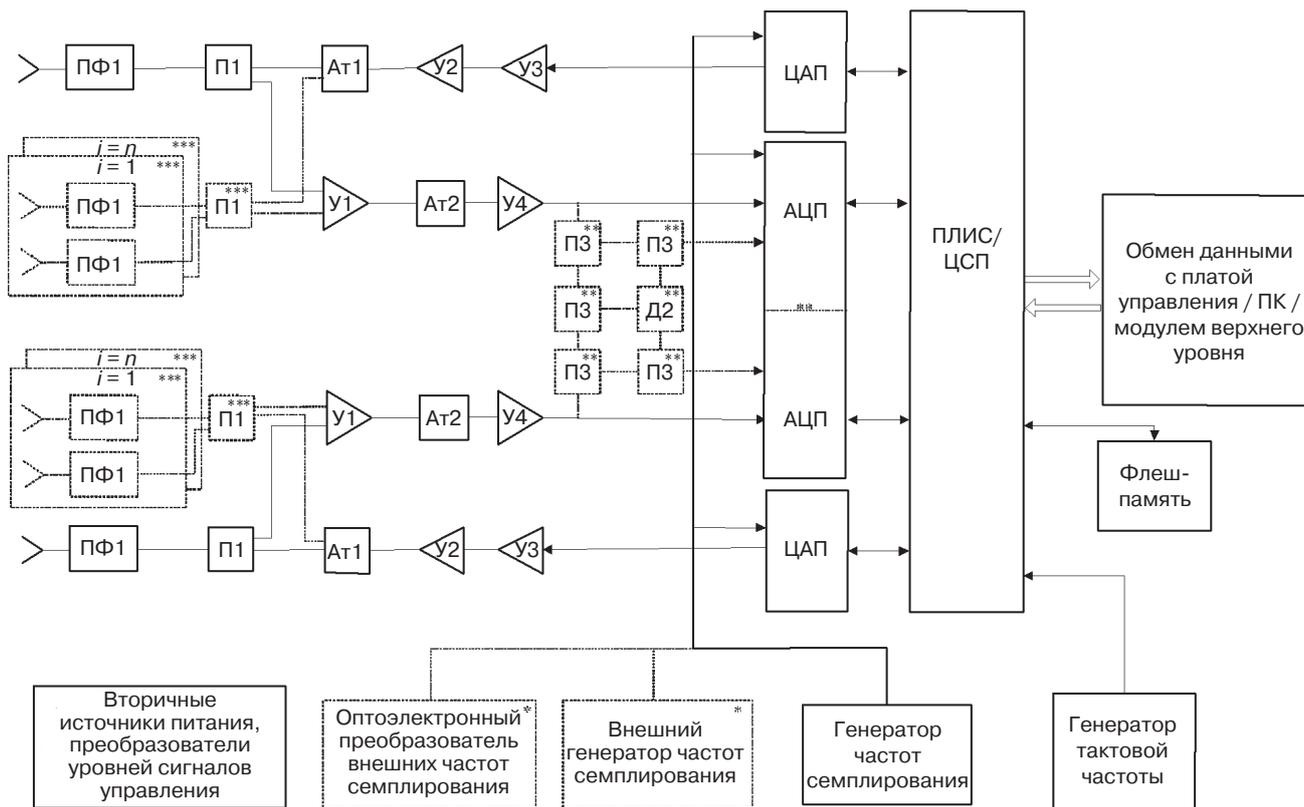


Рис. 1. Структурная схема БЦМ

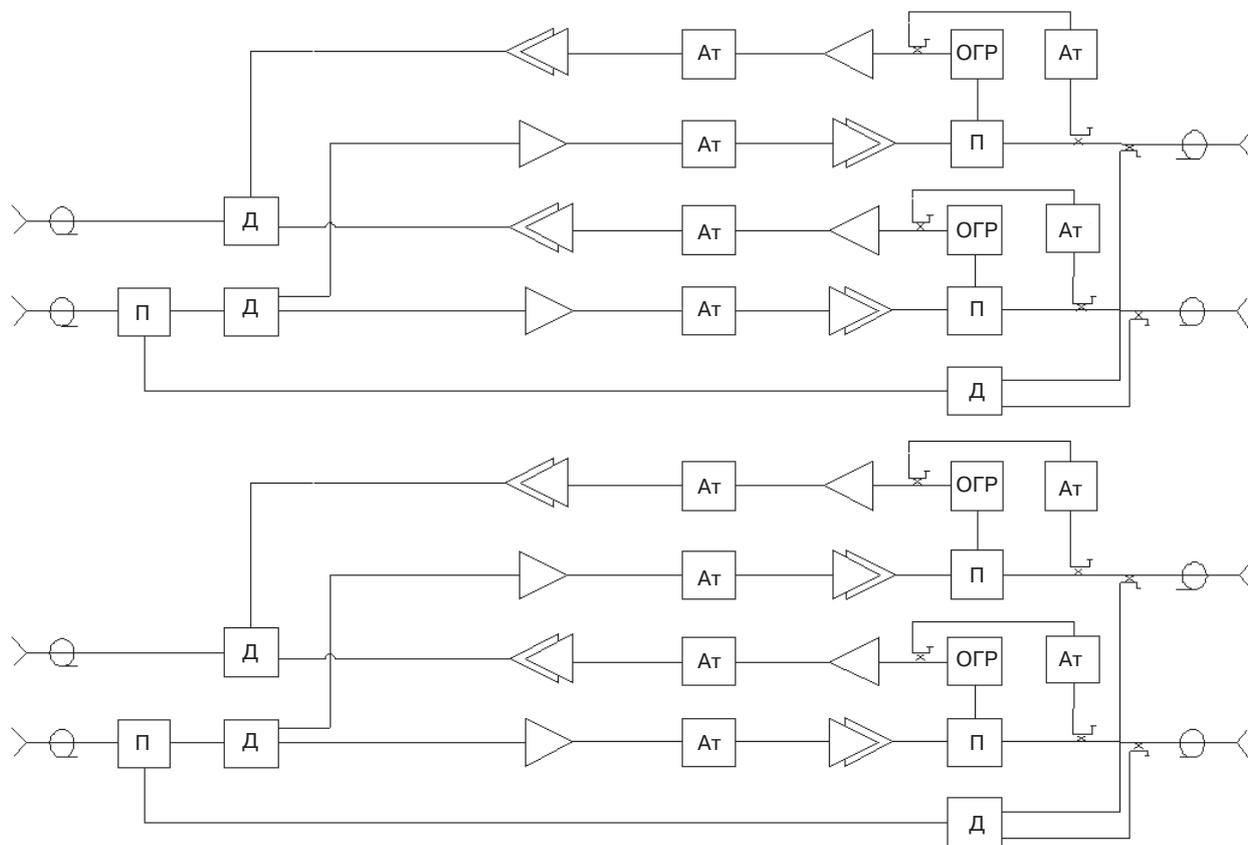


Рис. 2. Структурная схема СУРС

канал СОПЧ состоит из радиопотонного малошумящего усилителя, оптического модулятора, в котором осуществляется дополнительная модуляция сигналом местного гетеродина, выходного фотодетектора, преобразующего оптический сигнал в радиочастотный. Передающий канал предназначен для переноса радиочастотного сигнала в оптический диапазон и передачи сигнала по волоконно-оптическим линиям связи в приемник разнесенного спаренного СОПЧ. Научно-технический и практический задел для реализации СОПЧ создан на базе ООО «Технологии аппаратных решений» (ООО «ТАР») в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по теме «Разработка, изготовление и испытания прототипа радиопотонного приемопередатчика»^{1, 2, 3} при поддержке Фонда содействия инновациям⁴.

Структурная схема СОПЧ представлена на рис. 3.

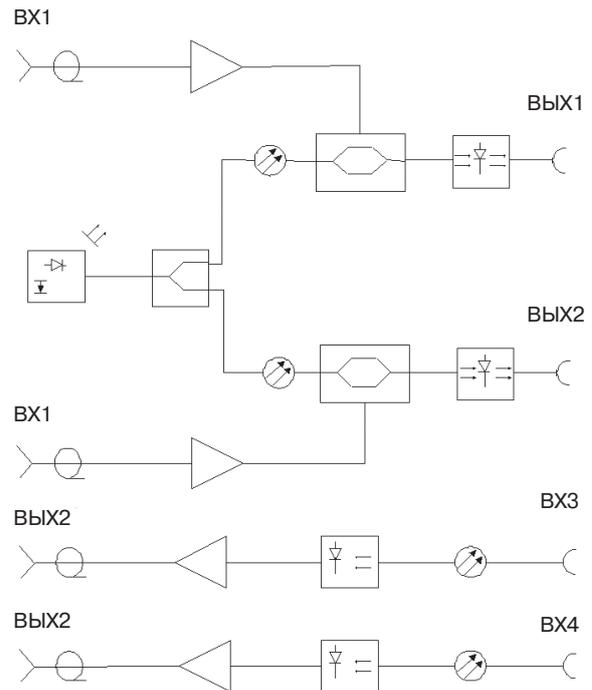


Рис. 3. Структурная схема СОПЧ

РАДИОФОТОННАЯ СИНХРОСЕТЬ

РФС предназначена для тактирования БЦМ оптическим синхросигналом. Особенностью предлагаемой системы фазовой синхронизации для всех АЦП, ЦАП и ПЛИС является использование единого высокостабильного источника тактовых сигналов, распределение которых осуществляется по одномодовым ВОЛС равной электрической длины, что снижает влияние собственных шумов источника тактовых сигналов и общих цепей их распределения (до оптического делителя) на ошибки измерения разности фаз принимаемого сигнала. Использование одномодового волокна позволяет снизить потери в тракте передачи, а также исключить влияние межмодовой дисперсии, которая приводит к искажению сигнала и снижению пропускной способности оптоволокну⁵. Структура радиопотонной синхросети, включающей задающий генератор и два разнесенных радиоэлектронных модуля АЦП, приведена на рис. 4.

Генератор тактовых сигналов формирует тактовую частоту АЦП $-f_1$ (S-диапазон), тактовую частоту сигнального процессора $-f_2$ (для быстродействующих АЦП, как правило, $f_1 = 2if_2$, где $i = 1, 2, 4$) и импульсные сигналы синхронизации и сброса АЦП. Для исключения временного расхождения четверки этих сигналов все они передаются по одному оптоволокну длиной, ориентировочно, несколько

⁵ Белкин М.Е. Компоненты волоконно-оптических систем: учебное пособие. М.: МИРЭА; 2010. 112 с. [Belkin M.E. Components of fiber-optic systems: tutorial. Moscow: MIREA; 2010. 112 p. (in Russ.).]

¹ Разработка, изготовление и испытания прототипа радиопотонного приемопередатчика: отчет о НИОКР (промежуточ.). ООО «ТАР». Руководитель Унченко И.В., исполнители: Емельянов А.А., Унченко И.В. и др. Малоярославец, 2021. 48 с. № ГР 121031900169-9. <https://www.rosrid.ru/ikrbs/detail/MYS684SV1OP68CW4NR4SZHWO>, дата обращения 01.06.2022. [Development, manufacture and testing of a prototype photonic transceiver: R&D report (interim), TAR, LLC. Director Unchenko I.V., executives: Emelyanov A.A., Unchenko I.V., et al. Maloyaroslavets, 2021. 48 p. Grant No. 121031900169-9. <https://www.rosrid.ru/ikrbs/detail/MYS684SV1OP68CW4NR4SZHWO>. Accessed June 01, 2022 (in Russ.).]

² Радиопотонный приемопередатчик: секрет производства (ноу хау). ООО «ТАР». Руководитель Унченко И.В., исполнители: Емельянов А.А., Унченко И.В. и др. Малоярославец, 2022. 53 с. № ГР 622011200395-5. <https://www.rosrid.ru/rid/detail/QPGRZIV0EEAEYARJU4BQ3I34>, дата обращения 01.06.2022. [Photonic radio transceiver: know-how. TAR, LLC. Director Unchenko I.V., executives: Emelyanov A.A., Unchenko I.V., et al. Maloyaroslavets, 2022. 53 p. Grant No. 622011200395-5. <https://www.rosrid.ru/rid/detail/QPGRZIV0EEAEYARJU4BQ3I34>. Accessed June 01, 2022 (in Russ.).]

³ Разработка, изготовление и испытания прототипа радиопотонного приемопередатчика: отчет о НИОКР. ООО «ТАР». Руководитель Унченко И.В., исполнители: Емельянов А.А., Унченко И.В. и др. Малоярославец, 2022. 70 с. № ГР 222021700414-1. <https://www.rosrid.ru/ikrbs/detail/UJCVU86GQ2YVRM2MUVQMY79U>, дата обращения 01.06.2022. [Development, manufacture and testing of a prototype photonic transceiver: R&D report (interim), TAR, LLC. Director Unchenko I.V., executives: Emelyanov A.A., Unchenko I.V. et al. Maloyaroslavets, 2022. 70 p. Grant No. 222021700414-1. <https://www.rosrid.ru/ikrbs/detail/UJCVU86GQ2YVRM2MUVQMY79U>. Accessed June 01, 2022 (in Russ.).]

⁴ <https://fasie.ru/>, дата обращения 01.06.2022. [<https://fasie.ru/>. Accessed June 01, 2022 (in Russ.).]

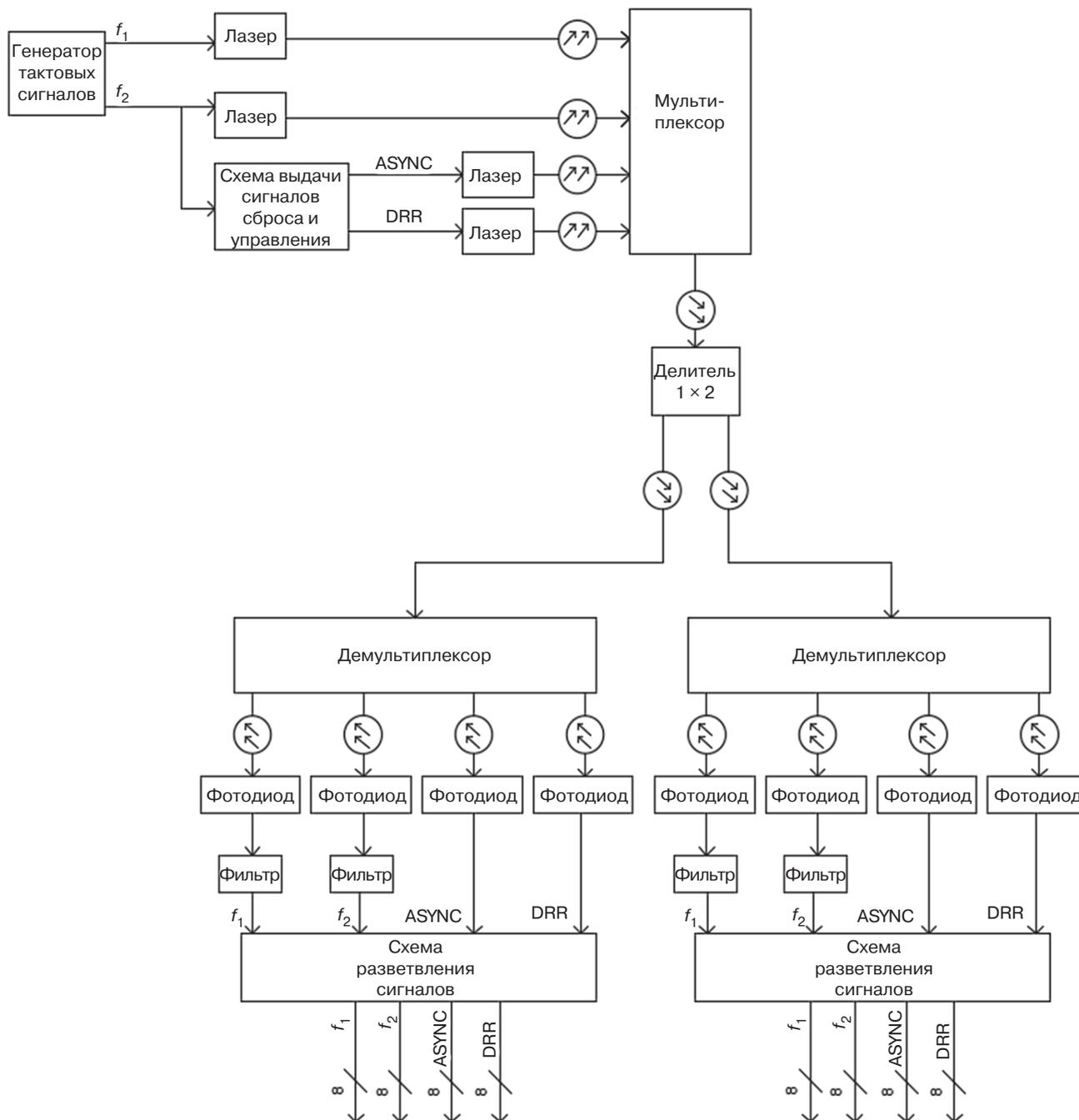


Рис. 4. Структура радиофотонной синхросети

десятков метров, а для их независимой передачи и приема используются четыре разнесенных по частоте лазера, оптические спектральные мультиплексоры и демультиплексоры. В цепях прохождения тактовых сигналов после фотодиодов установлены полосовые фильтры, при этом для сигналов сброса ПЛИС (DRR) и АЦП (ASYNC) фильтрация не требуется.

Кроме фазового шума существуют и другие источники фазовых искажений в оптоволокне: температура, вибрация и акустика, хроматическая дисперсия, поляризационно-модовая дисперсия и переходные

помехи [10]. На основе материалов, представленных в [10], был проведен расчет вносимой фазовой ошибки. Результаты расчета представлены в таблице.

В таблице использованы следующие обозначения: n – эффективный групповой показатель преломления кварцевого волокна, для стандартно используемого одномодового волокна SMF-28 типовое значение $n = 1.468^6$; L – длина волокна, для данной системы

⁶ <https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/PI-1463-AEN.pdf>, дата обращения 01.06.2022. [<https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/PI-1463-AEN.pdf>. Accessed 01.06.2022.]

Таблица. Результаты расчета вносимой фазовой ошибки

№ п/п	Эффект	Расчетная формула	Расчетное значение
1	Температура	$\frac{d\varphi}{dT} = \frac{\omega_r L}{c} \left(\frac{n}{L} \frac{dL}{dT} + \frac{dn}{dT} \right)$	Рис. 5
2	Вибрации и акустика	$\frac{d\varphi}{d\sigma} = \frac{\omega_r L}{c} \left(\frac{n}{L} \frac{dL}{d\sigma} + \frac{dn}{d\sigma} \right)$	Рис. 6
3	Хроматическая дисперсия	$\Delta\varphi = \omega_r D_L \Delta\lambda$	$1.1 \cdot 10^{-4}$ град
4	Поляризационная модовая дисперсия	$\Delta\varphi = \omega_r D_{\text{pmd}} L^{1/2}$	$2.2 \cdot 10^{-4}$ град
5	Переходные помехи	$\Delta\varphi = \arctg(10^{A_c/20})$	1.8 град

составляет 20 м; c – скорость света; ω_r – угловая частота синхросигнала S-диапазона; T – температура, °C; $(1/L)dL/dT$ – коэффициент термического расширения, типовое значение $5.6 \cdot 10^{-7}/^\circ\text{C}$, $1/^\circ\text{C}$; dn/dT – температурный коэффициент показателя преломления, типовое значение $1.2 \cdot 10^{-5}$, $1/^\circ\text{C}$; $[(1/L)dL/d\sigma]^{-1}$ и $dn/d\sigma$ – модули Юнга, соответственно, по длине и показателю преломления волокна, типовые значения: $7.2 \cdot 10^{10}$ Па и $-3.4 \cdot 10^{-12}/\text{Па}$, $1/\text{Па}$; D – коэффициент хроматической дисперсии, типовое значение 18 пс/(нм·км); $\Delta\lambda$ – разность длин волн между оптической несущей и составляющими боковых полос первого порядка в спектре распространяющегося по волокну модулированного по интенсивности оптического сигнала, для C-оптического диапазона (1551–1563 нм) определяется по частоте тактового радиосигнала в гигагерцах из пропорции $10 \text{ ГГц} \approx 80 \text{ пм}$; D_{pmd} – коэффициент поляризационной модовой дисперсии, типовое значение $0.1 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}$; A_c – относительный уровень переходной помехи, которая проявляется при мультиплексировании, как правило, ее значение составляет –30 дБ.

Таким образом, предложенный вариант построения системы фазовой синхронизации способен распределить по всем АЦП единый тактовый сигнал от одного источника на расстояние до десятка метров и передать на устройства обработки сигналы сброса и синхронизации. При этом значение теоретической фазовой ошибки обрабатываемых сигналов составит не более 1.8 град, основную часть которой вносит блок мультиплексирования сигналов.

МОДУЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА ЦАР

Предложенные решения для построения системы синхронизации и интегрального тракта при использовании направленных излучателей с оптимальным шагом уже являются как самостоятельными устройствами, так и ячейкой ЦАР. Интеграцию БЦМ и СУРС в ЦАР возможно произвести по внешним интерфейсам БЦМ с использованием решений в области бортовых электронно-вычислительных

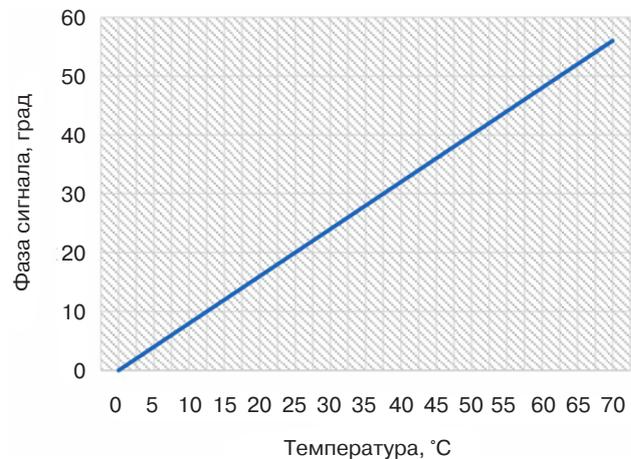


Рис. 5. Зависимость изменения фазы сигнала от температуры

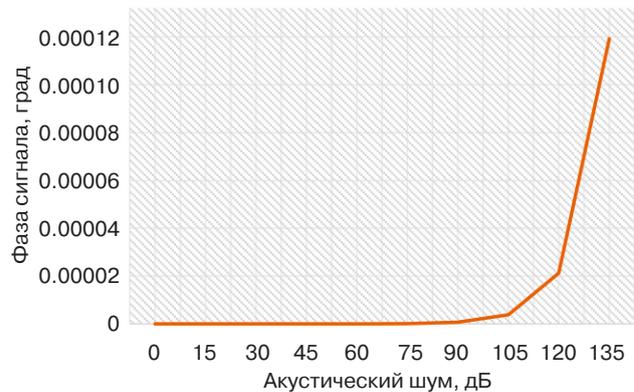


Рис. 6. Зависимость изменения фазы сигнала от уровня акустического шума

машин и центров обработки данных. Основным ограничением при наращивании полотна ЦАР является пропускная способность интерфейсов КИО. Дополнительно для построения диаграммы направленности и обеспечения электронного сканирования ЦАР требуется максимальная точность синхронизации АЦП и ЦАП. Структурная схема ЦАР на основе модульной архитектуры представлена на рис. 7, где ТАКТ1–ТАКТn синхросигналы и сигналы сброса АЦП и ПЛИС, формируемые РФС.

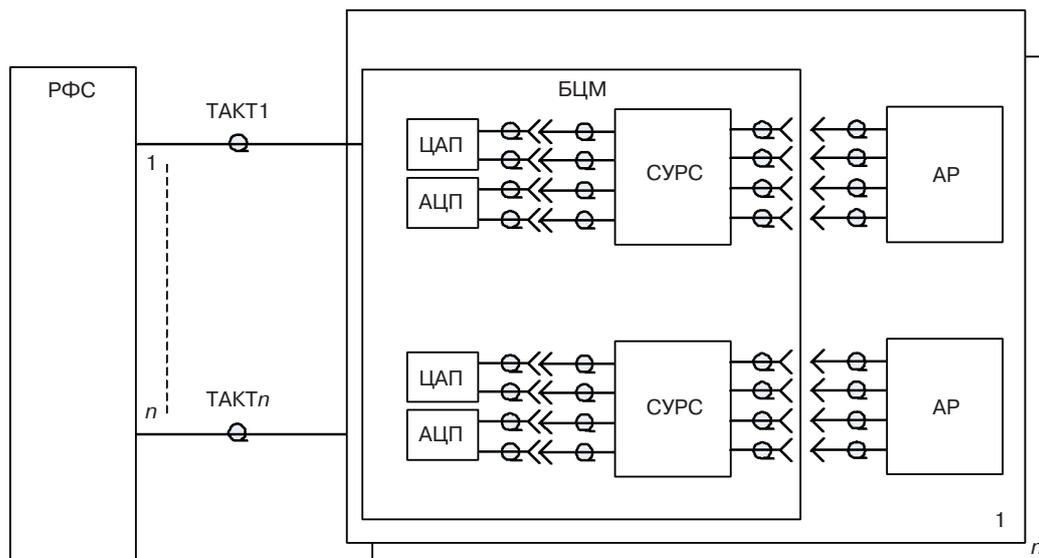


Рис. 7. Структурная схема ЦАР

Необходимые значения распределения фаз между каналами рассчитываются в зависимости от конструкции антенной решетки (АР), определяющей диаграмму направленности, угла обзора и необходимого числа положений луча. Для построения диаграммы направленности такой системы рассмотрена восьми-элементная антенная линейка на основе излучателей Вивальди, общий вид которой приведен на рис. 8.

Широкополосные излучатели на основе симметричных щелевых линий (излучатель Вивальди) хорошо известны, их разновидности широко представлены в [11, 12], методы ЦДФ описаны в [13–15], а варианты формирования луча, методы сканирования в АФАР и расчеты фазового распределения для такой решетки приведены в [12, 13].

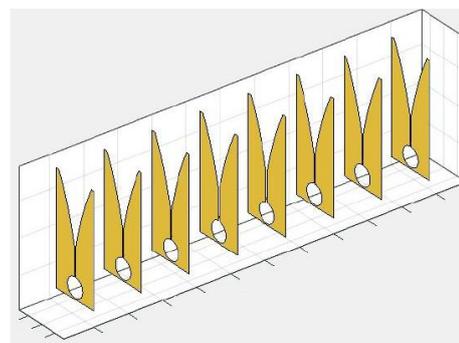


Рис. 8. Общий вид антенной линейки

Расчетная диаграмма направленности и отклонение луча восьмиэлементной АР представлены на рис. 9.

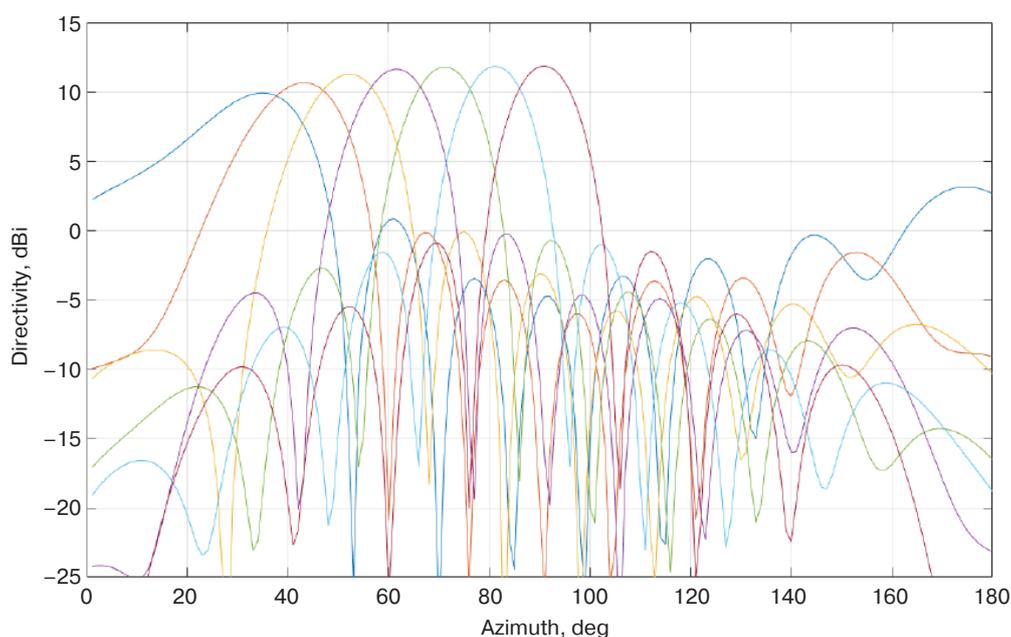


Рис. 9. Результаты расчета диаграмм направленности АР

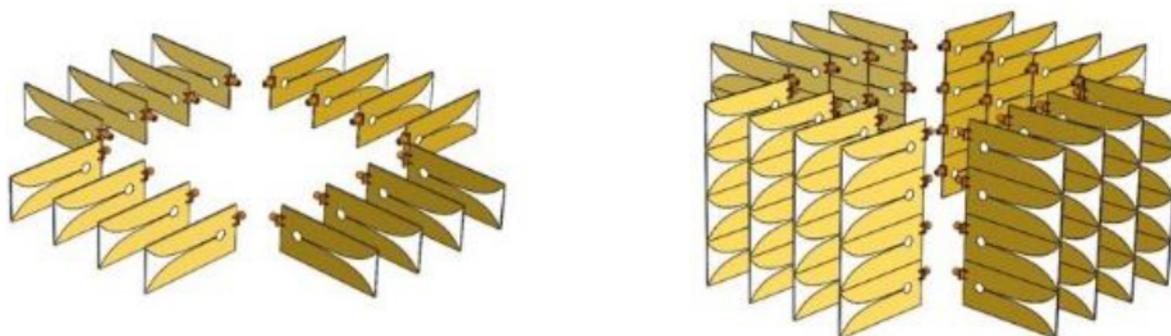


Рис. 10. Антенные системы ЦАР

На рис. 10 представлены антенные системы, построенные по принципу комплексирования и масштабирования ЦАР на основе модульной архитектуры, обеспечивающие прием и передачу сигналов в диапазоне углов 360° в азимутальной и в угломестной плоскости. Каждый модуль имеет в своей основе излучатель типа Вивальди с экспоненциальным раскрытием, одним из достоинств которого является широкополосность [16, 17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные схемно-конструктивные решения позволят существенно сократить сроки разработки новых типов систем за счет линейки готовых

технических решений. Разработанные устройства обладают параметрами, не уступающими лучшим мировым аналогам, а в рамках интеграции в систему позволяют превзойти существующие решения. Апробирование разработок проведено в рамках НИОКР на базе АО «Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт» и ООО «ТАР», предложенные решения интегрированы на уровне подсистем в перспективных разработках продукции гражданского и специального назначения.

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

1. Du J.F., Fan X.J., Cao X.H., Li M., Zhu N.H., Li W. Transmission of dual-chirp microwave signal over fiber with suppression chromatic-dispersion-induced power-fading based on stimulated Brillouin scattering. *Opt. Commun.* 2022;508:127787. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127787>
2. Mo Zh., Li R., Yang J., Dong J., Cao J., Li W. A photonics radar with remoting antenna based on photonic assisted signal generation and stretch processing. In: *2019 IEEE Radar Conference (RadarConf)*. 2019. Accession Number: 18993737. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2019.8835512>
3. Kashin V.A., Shurygina I.S. Synthesis of multibeam directivity patterns to improve performance of radar stations with an active phased antenna array. *J. Commun. Technol. Electron.* 2021;66(10):1155–1162. <https://doi.org/10.1134/S1064226921100089>
4. Быстров Р.П., Соколов С.А., Черепенин В.А. Системы и устройства на основе радиопотоники применительно к радиолокации. *Журнал радиоэлектроники*. 2017;6. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/3/text.pdf>

REFERENCES

1. Du J.F., Fan X.J., Cao X.H., Li M., Zhu N.H., Li W. Transmission of dual-chirp microwave signal over fiber with suppression chromatic-dispersion-induced power-fading based on stimulated Brillouin scattering. *Opt. Commun.* 2022;508:127787. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127787>
2. Mo Zh., Li R., Yang J., Dong J., Cao J., Li W. A photonics radar with remoting antenna based on photonic assisted signal generation and stretch processing. In: *2019 IEEE Radar Conference (RadarConf)*. 2019. Accession Number: 18993737. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2019.8835512>
3. Kashin V.A., Shurygina I.S. Synthesis of multibeam directivity patterns to improve performance of radar stations with an active phased antenna array. *J. Commun. Technol. Electron.* 2021;66(10):1155–1162. <https://doi.org/10.1134/S1064226921100089>
4. Bystrov R.P., Sokolov S.A., Cherepenin V.A. On the possibility of radio photonics technique in radar applications. *Zhurnal radioelektroniki = J. Radio Electronics*. 2017;6 (in Russ.). Available from URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/3/text.pdf>

5. Голов Н.А., Усачев В.А., Боев С.Ф., Савченко В.П., Шулунов А.Н., Зубарев Ю.Б. Эволюция радиопhotоники и перспективы ее применения в радиолокации. *РТИ Системы ВКО – 2017: Труды V Всерос. научно-техн. конф.* 2018. С. 292–320.
6. Lee J.J., et al. Photonic wideband array antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1995;43(9):966–982. <https://doi.org/10.1109/8.410214>
7. Winnall S.T., Lindsay A.C., Knight G.A. A wideband microwave photonic phase and frequency shifter. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1997;45(6):1003–1006. <https://doi.org/10.1109/22.588620>
8. Yao J. Microwave photonics. *J. Lightwave Technology*. 2009;27(3):314–335. <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.2009551>
9. Унченко И.В. Модульная многопозиционная цифровая радиопhotонная система. В сб.: *Молодежь и будущее авиации и космонавтики – 2020: Сборник аннотаций конкурсных работ. 12-й Всероссийский межотраслевой молодежный конкурс научно-технических работ и проектов в области авиационной и ракетно-космической техники и технологий.* 2020. 123 с.
10. Емельянов А.А. Белкин М.Е., Топорков Н.В., Масной В.А. Особенности построения бортовой волоконно-оптической синхросети. *Радиотехника*. 2017;8:121–126.
11. Воскресенский Д.И., Котов Ю.В., Овчинникова Е.В. Тенденции развития широкополосных фазированных антенных решеток (обзор работ). *Антенны*. 2005;11:7–21.
12. Wang F., Wang P., Zhang X., Li H., Himed B. An overview of parametric modeling and methods for radar target detection with limited data. In: *IEEE Access*. 2021;9:60459–60469. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3074063>
13. Григорьев Л.Н. *Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках*. М.: Радиотехника; 2010. 144 с. ISBN 978-5-88070-243-5
14. Maltsev S.B., Shcherbakov M.V., Voitovych O.N., et al. Investigation and tuning procedure of Ka-band phased antenna array. *Radioelectron. Commun. Syst.* 2021;64(9):501–508. <https://doi.org/10.3103/S0735272721090053>
15. Легкий Н.М., Унченко И.В. Формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. *Российский технологический журнал*. 2019;7(2):29–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-2-29-38>
16. Gross F.B. *Frontiers in Antennas: Next Generation Design & Engineering*. The McGraw-Hill Companies; 2011. 526 p.
17. Унченко И.В. Диаграммообразование активных фазированных антенных решеток. *Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта*. 2018;14:331–337.
5. Golov N.A., Usachev V.A., Boev S.F., Savchenko V.P., Shulunov A.N., Zubarev Yu.B. Evolution of radiophotonics and prospects for its application in radar. In: *RTI Systems VKO 2017: Proceedings of the V All-Russian Scientific and Technical. Conf.* 2018. P. 292–320 (in Russ.).
6. Lee J.J., et al. Photonic wideband array antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1995;43(9):966–982. <https://doi.org/10.1109/8.410214>
7. Winnall S.T., Lindsay A.C., Knight G.A. A wideband microwave photonic phase and frequency shifter. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1997;45(6):1003–1006. <https://doi.org/10.1109/22.588620>
8. Yao J. Microwave photonics. *J. Lightwave Technology*. 2009;27(3):314–335. <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.2009551>
9. Unchenko I.V. Modular multi position digital radio frequency photonics system. In: *Youth and the Future of Aviation and Cosmonautics 2020: Collection of abstracts of competitive works. The 12th All-Russian Intersectoral Youth Competition of Scientific and Technical Works and Projects in the Field of Aviation and Rocket and Space Technologies*. 2020. P. 123 (in Russ.).
10. Emel'yanov A.A. Belkin M.E., Toporkov N.V., Masnoi V.A. The features of designing onboard fiber-optic synchronetwork. *Radiotekhnika = J. Radioengineering*. 2017;8:121–126 (in Russ.).
11. Voskresenskii D.I., Kotov Yu.V., Ovchinnikova E.V. Trends in the development of broadband phased antenna arrays (review). *Antenny = J. Antennas*. 2005;11(102):7–21 (in Russ.).
12. Wang F., Wang P., Zhang X., Li H., Himed B. An overview of parametric modeling and methods for radar target detection with limited data. In: *IEEE Access*. 2021;9:60459–60469. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3074063>
13. Grigor'ev L.N. *Tsifrovoye formirovaniye diagrammy napravlennosti v fazirovannykh antenykh reshetkakh (Digital Beam Forming in Phased Antenna Arrays)*. Moscow: Radiotekhnika; 2010. 144 p. (in Russ.). ISBN 978-5-88070-243-5
14. Maltsev S.B., Shcherbakov M.V., Voitovych O.N., et al. Investigation and tuning procedure of Ka-band phased antenna array. *Radioelectron. Commun. Syst.* 2021;64(9):501–508. <https://doi.org/10.3103/S0735272721090053>
15. Legkiy N.M., Unchenko I.V. Formation of the direction diagram in phased antenna arrays. *Russian Technological Journal*. 2019;7(2):29–38 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-2-29-38>
16. Gross F.B. *Frontiers in Antennas: Next Generation Design & Engineering*. The McGraw-Hill Companies; 2011. 526 p.
17. Unchenko I.V. Diagram formation of active phased antenna arrays. *Sovremennye problemy sovershenstvovaniya raboty zheleznodorozhnogo transporta*. 2018;14:331–337 (in Russ.).

Об авторах

Унченко Иван Владимирович, старший преподаватель кафедры инженерной экологии техносферы Института радиоэлектроники и информатики, начальник отдела по разработке аппаратных средств Отделения инновации и разработки Научно-технологического центра «Наука» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); инженер АО «Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт» (249192, Калужская область, г. Жуков, ул. Ленина, д. 2); генеральный директор ООО «Технологии аппаратных решений» (249096, Калужская область, г. Малоярославец, ул. Герцена, д. 60А). E-mail: unchenkoivan@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 8819-1136, <https://orcid.org/0000-0002-6048-3476>

Емельянов Андрей Александрович, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории Отделения инновации и разработки Научно-технологического центра «Наука» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); инженер АО «Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт» (249192, Калужская область, г. Жуков, ул. Ленина, д. 2); заместитель генерального директора, научный сотрудник ООО «Технологии аппаратных решений» (249096, Калужская область, г. Малоярославец, ул. Герцена, д. 60А). E-mail: nd1794@yandex.ru. SPIN-код РИНЦ 7890-4740, <https://orcid.org/0000-0002-0839-7853>

About the authors

Ivan V. Unchenko, Senior Lecturer, Department of Engineering Ecology of the Technosphere, Institute of Radio Electronics and Informatics, Head of the Hardware Development Department of the Innovation and Development Department of the Science and Technology Center “Science,” MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia); Engineer, Kaluga Scientific Research Institute of Radio Technology (2, Lenina ul., Zhukov, Kaluga oblast, 249192 Russia); General Director, Hardware Solutions Technologies (60A, Herzena ul., Maloyaroslavets, Kaluga oblast, 249096 Russia). E-mail: unchenkoivan@gmail.com. RSCI SPIN-code 8819-1136, <https://orcid.org/0000-0002-6048-3476>

Andrey A. Emelyanov, Senior Researcher, Research Laboratory of the Innovation and Development Department of the Science and Technology Center “Science,” MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia); Engineer, Kaluga Scientific Research Institute of Radio Technology (2, Lenina ul., Zhukov, Kaluga oblast, 249192 Russia); Deputy General Director, Researcher, Hardware Solutions Technologies (60A, Herzena ul., Maloyaroslavets, Kaluga oblast, 249096 Russia). E-mail: nd1794@yandex.ru. RSCI SPIN-code 7890-4740, <https://orcid.org/0000-0002-0839-7853>

УДК 621.3.09
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-38-43>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Параметризация пользовательских функций в цифровой обработке сигналов для получения углового сверхразрешения

А.А. Щукин[®], А.Е. Павлов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, shchukin.a.a@edu.mirea.ru

Резюме

Цели. Одна из важнейших задач развития угломерных систем – улучшение разрешающей способности по угловым координатам. Этого можно добиться двумя способами: во-первых, увеличением апертуры такой системы, что весьма дорого и часто технически трудно выполнимо; во-вторых, с помощью методов цифровой обработки сигналов. Если регистрируемые источники сигнала расположены близко друг к другу и не разрешаются по критерию Рэлея, то невозможно определить их количество, расположение и характеристики отражения. Цель работы – разработка алгоритма цифровой обработки сигналов для получения углового сверхразрешения.

Методы. Используются математические методы решения обратных задач. Эти методы позволяют преодолеть критерий Рэлея, т.е. дают возможность получить угловое сверхразрешение. Данные задачи обладают неустойчивостью. Существует бесконечное количество приближенных решений, возможно возникновение ложных целей. Поиск оптимального решения проводится путем минимизации среднеквадратического отклонения.

Результаты. В статье приведено описание математической модели работы угломерной системы. На основе существующих методов разработан алгоритм обработки сигнала, использующий принцип параметризации пользовательских функций. Представлены результаты численных экспериментов по достижению сверхразрешения алгебраическими методами. Проведена оценка устойчивости решения. Измерены точность и соответствие амплитуды полученных объектов начальным параметрам. Проведена оценка степени превышения критерия Рэлея полученным решением.

Выводы. Показано, что алгебраические методы позволяют получать устойчивые решения с угловым сверхразрешением. Получаемые результаты правильно отражают расположение объектов с незначительной ошибкой. Ошибки в распределении амплитуды сигнала невелики, появляющиеся ложные цели имеют пренебрежимо малую амплитуду.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, сверхразрешение, поиск объектов, имитационная модель

• Поступила: 15.12.2021 • Доработана: 17.05.2022 • Принята к опубликованию: 24.06.2022

Для цитирования: Щукин А.А., Павлов А.Е. Параметризация пользовательских функций в цифровой обработке сигналов для получения углового сверхразрешения. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):38–43. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-38-43>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Parameterization of user functions in digital signal processing for obtaining angular superresolution

Andrey A. Shchukin[®], Aleksandr E. Pavlov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: shchukin.a.a@edu.mirea.ru

Abstract

Objectives. One of the most important tasks in the development of goniometric systems is improving resolution in terms of angular coordinates. This can be achieved in two ways: firstly, by increasing the aperture, which is very expensive and often technically challenging to implement; secondly, with the help of digital signal processing methods. If the recorded signal sources are located close to each other and not resolved by the Rayleigh criterion, it can be impossible to determine their number, location and reflection characteristics. The aim of the present work is to develop a digital signal processing algorithm for obtaining angular superresolution.

Methods. Mathematical methods for solving inverse problems are used to overcome the Rayleigh criterion, i.e., obtain angular superresolution. These problems are unstable, since there is an infinite number of approximate solutions and false targets may occur. The search for the optimal solution is carried out by minimizing the standard deviation.

Results. A description of a mathematical model for a goniometric system is presented. A signal processing algorithm is developed based on existing methods according to the principle of parameterization of user functions. Results of numerical experiments for achieving superresolution by algebraic methods are given along with an estimation of solution stability. The accuracy and correspondence of the amplitude of the obtained objects to the initial parameters are measured. The degree of excess of the Rayleigh criterion by the obtained solution is estimated.

Conclusions. Algebraic methods can be used to obtain stable solutions with angular superresolution. The results obtained correctly reflect the location of objects with a minor error. Errors in the distribution of the signal amplitude are small, appearing false targets have negligible amplitude.

Keywords: computer simulation, super resolution, object search, simulation model

• Submitted: 15.12.2021 • Revised: 17.05.2022 • Accepted: 24.06.2022

For citation: Shchukin A.A., Pavlov A.E. Parameterization of user functions in digital signal processing for obtaining angular superresolution. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):38–43. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-38-43>

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

Угломерные системы имеют множество областей применения. Определяющими критериями при реализации такой системы являются точность и быстродействие. Существуют различные способы получения углового сверхразрешения – метод Кейпона, метод теплового шума, MUSIC (Multiple Signal Classification), ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariant Techniques) и др. Такие методы, как MUSIC и ESPRIT, используют узкополосные сигналы и неэффективны при

использовании широкополосных и сверхширокополосных сигналов (СШП, UWB – Ultra-Wide Band). Многие из этих методов не являются достаточно эффективными и универсальными, т.к. при отношении сигнал/шум менее 20 дБ возникают ошибки в решении [1–8]. Кроме того, далеко не все перечисленные методы позволяют решать двумерные задачи [9–11].

В данном исследовании разработан алгоритм приближенного определения углового расположения близкорасположенных целей. Рассматриваемые в статье алгебраические методы дают возможность получить решение с низкими вычислительными

затратами. Представленный алгоритм имеет высокое быстродействие, что позволяет использовать его в режиме реального времени. Для оценки качества работы метода измеряется степень превышения критерия Рэлея полученным решением.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Модель принимаемого системой наблюдения сигнала представляет собой двумерный интеграл (1):

$$U(x, y) := \int_{\Omega} F(x - q, y - r) I(q, r) drdq, \quad (1)$$

где $F(x, y)$ – диаграмма направленности (ДН) системы наблюдения; Ω – двумерная область расположения источника; $I(q, r)$ – угловое распределение амплитуды источника сигнала, которое подлежит определению [12, 13].

Целью исследования является разработка алгоритма цифровой обработки сигналов для получения углового сверхразрешения.

Задача исследования – восстановить угловые распределения амплитуды отраженного сигнала по измененному сигналу $U(x, y)$ и известным характеристикам угломерной системы. Для этого необходимо получить приближенное решение линейного интегрального уравнения Фредгольма первого рода типа свертки (1).

Получение углового сверхразрешения с помощью цифровой обработки сигнала $U(x, y)$ представляет собой решение обратной задачи.

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Поиск решения обратной задачи проводится на основе параметризации [14, 15], когда вместо неизвестной функции $I(q, r)$ используется разложение искомого распределения амплитуд по задаваемой системе ортогональных функций. Тогда решение может быть представлено в виде:

$$I(q, r) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i g_i(q, r) \approx \sum_{i=1}^N a_i g_i(q, r), \quad (2)$$

где a_i – неизвестные коэффициенты; $g_i(q, r)$ – функции, задаваемые пользователем. Коэффициенты a_i могут быть найдены путем минимизации среднеквадратичного отклонения решения в области $\theta > \Omega$ от исходного сигнала:

$$\delta^2 = \int_{\theta} \left[U(x, y) - \sum_{i=1}^{\infty} a_i \int_{\Omega} F(x - q, y - r) g_i(q, r) drdq \right]^2 dydx, \quad (3)$$

где θ – двумерная область сканирования.

Для этого приравниваются нулю частные производные δ^2 по a_i . В итоге получается система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) из N уравнений:

$$a = GV, \quad (4)$$

где

$$G_{j,i} := \int_{\theta} \psi_j(x, y) \psi_i(x, y) dydx, \quad (5)$$

$$\psi_i = \int_{\Omega} F(x - q, y - r) g_i(q, r) drdq, \quad (5)$$

$$V_j := \int_{\theta} U(x, y) \psi_j(x, y) dydx. \quad (6)$$

Угловое сверхразрешение увеличивается при использовании большего количества функций $g_i(q, r)$, однако с увеличением их количества также возрастает размерность СЛАУ и, следовательно, неустойчивость решения. Она проявляется в виде ложных источников сигнала и искажений в полученном решении. Это связано с особенностью обратных задач, которая состоит в том, что незначительные изменения исходных данных, например, случайные величины (шумы) могут привести к значительным ошибкам, т.е. к неустойчивости. Если в корректно поставленных задачах небольшие шумы приводят к небольшим ошибкам в решении, то в обратных задачах полученное решение может отличаться от истинного на несколько порядков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Получаемые решения обратных задач исследовались в ходе численных экспериментов на математических моделях. Исходные объекты и принимаемый сигнал представлены на рис. 1, где $\theta_{0.5}$ – полуширина ДН. Были заданы три точечных объекта. Все объекты расположены достаточно близко друг к другу и не разрешаются по критерию Рэлея.

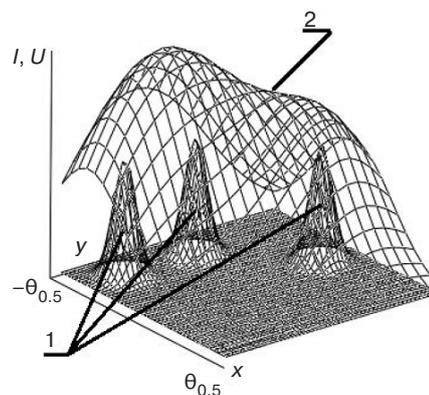


Рис. 1. Модель принимаемого сигнала и исходные объекты: 1 – исходные объекты; 2 – принимаемый сигнал

Вид сигнала $U(x, y)$ не позволяет отдельно наблюдать объекты, в частности, три исходных объекта сливаются в один (сетчатая поверхность 2).

Для поиска решения задаются девять функций $g_i(q, r)$, покрывающих всю исследуемую область Ω , три из которых представлены на рис. 2.

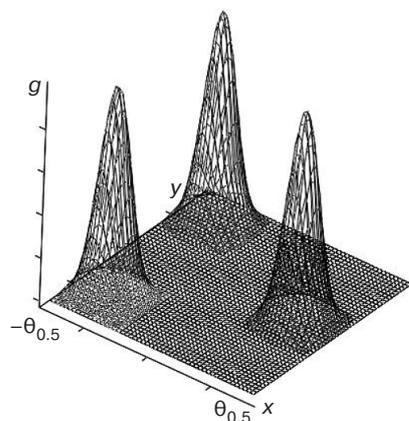


Рис. 2. Вид трех пользовательских функций

Результат решения системы СЛАУ (4)–(6) и исходные объекты представлены на рис. 3.

В результате эксперимента было получено устойчивое решение с угловым сверхразрешением. Угловые координаты всех трех объектов определены с хорошей точностью, найденные амплитуды центрального и правого объекта близки к исходной (около 80% от исходной), амплитуда левого объекта несколько ниже исходной (около 60% от исходной). Полученное угловое сверхразрешение существенно превышает критерий Рэлея (угловое расстояние между объектами составляет 0.3θ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что алгебраические методы позволяют получать устойчивые решения обратных задач с угловым сверхразрешением, которые отражают расположение исходных объектов с незначительной ошибкой (координаты исходных объектов и полученного решения совпадают). Ошибки в распределении амплитуды сигнала невелики (амплитуда полученного решения составляет от 60% до 80% от амплитуды исходных объектов). Между

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леховицкий Д.И. Статистический анализ сверхразрешающих методов пеленгации источников шумовых излучений при конечном объеме обучающей выборки. *Прикладная радиоэлектроника*. 2009;8(4):526–541.

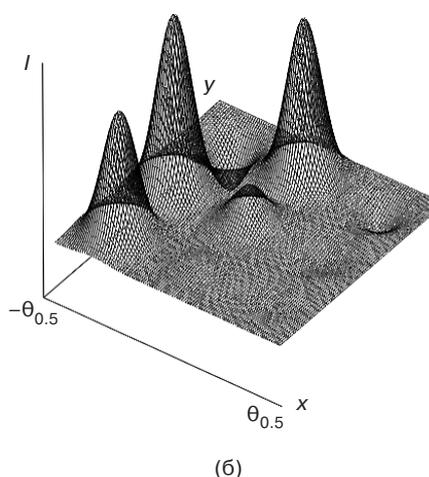
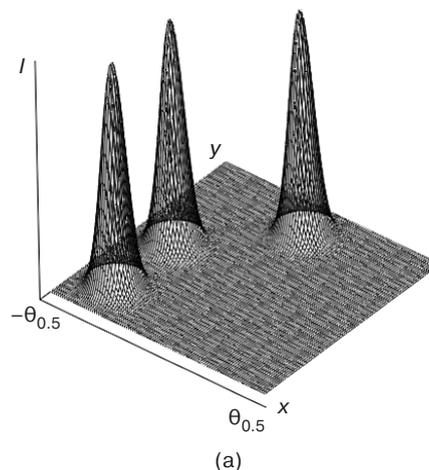


Рис. 3. Исходные объекты (а) и полученный результат (б)

центральным и правым объектом появляется ложная цель, но с пренебрежимо малой амплитудой, менее 10% от амплитуды истинных объектов (рис. 3б, в центре области).

Вклад авторов

А.А. Щукин – подготовка статьи, алгоритмов, графического материала.

А.Е. Павлов – подготовка статьи, алгоритмов, графического материала.

Authors' contributions

A.A. Shchukin – preparing algorithms and graphic materials, writing the text of the article.

A.E. Pavlov – preparing algorithms and graphic materials, writing the text of the article.

REFERENCES

1. Lekhovitskii D.I. Statistical analysis of superresolution methods for direction finding of noise sources with a finite volume of training sample. *Prikladnaya radioelektronika*. 2009;8(4):526–541 (in Russ.).

2. Bhaskar D. Rao, Hari K.V.S. Weighted subspace methods and spatial smoothing: analysis and comparison. *IEEE Transaction. Signal Process.* 1993;41(2):788–803. <https://doi.org/10.1109/78.193218>
3. Хачатуров В.Р., Федоркин Ю.А., Коновальчик А.С. Влияние случайных фазовых ошибок приемных каналов антенной решетки на качество разрешения источников внешнего излучения. *Антенны.* 2000;2:55–59.
4. Ратынский М.В. Анализ характеристик алгоритмов пеленгации со сверхразрешением. *Радиотехника.* 1992;(10–11):63–66.
5. Roy R., Kailath T. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing.* 1989;37(7):984–995. <https://doi.org/10.1109/29.32276>
6. Rao B.D., Hari K.V.S. Performance analysis of Root-Music. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing.* 1989;37(12):1939–1949. <https://doi.org/10.1109/29.45540>
7. Stoica P., Nehorai A. Performance comparison of subspace rotation and MUSIC methods for direction estimation. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing.* 1991;39(2):446–453. <https://doi.org/10.1109/78.80828>
8. Трифонов А.П., Шинаков Ю.С. *Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех.* М.: Радио и связь; 1986. 264 с.
9. Lagovsky B., Samokhin A., Shestopalov Y. Increasing effective angular resolution measuring systems based on antenna arrays. In: *2016 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS).* 2016. P. 432–434. <https://doi.org/10.1109/URSI-EMTS.2016.7571418>
10. Lagovsky B.A., Samokhin A.B. Superresolution in signal processing using a priori information. In: *Proceedings of the 2017 19th International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA).* 2017. P. 779–783. <https://doi.org/10.1109/ICEAA.2017.8065365>
11. Lagovsky B.A., Chikhina A.G. Superresolution in signal processing using a priori information. In: *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS).* 2017. P. 944–947. <https://doi.org/10.1109/PIERS.2017.8261879>
12. Lagovsky B.A., Samokhin A.B., Shestopalov Y.V. Creating two-dimensional images of objects with high angular resolution. In: *2018 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP).* 2018. P. 114–115. <https://doi.org/10.1109/APCAP.2018.8538220>
13. Lagovsky B., Samokhin A., Shestopalov Y. Angular superresolution based on a priori information. *Radio Science.* 2021;56(1):e2020RS007100. <https://doi.org/10.1029/2020RS007100>
14. Лаговский Б.А., Самохин А.Б. Достижение углового сверхразрешения на основе априори известной информации. *Физические основы приборостроения.* 2019;8(4–34):16–22. <https://doi.org/10.25210/jfop-1904-016022>
15. Лаговский Б.А., Чикина А.Г. Регрессионные методы получения сверхразрешения для групповой цели. *Успехи современной радиоэлектроники.* 2020;1:69–76.
2. Bhaskar D. Rao, Hari K.V.S. Weighted subspace methods and spatial smoothing: analysis and comparison. *IEEE Transaction. Signal Process.* 1993;41(2):788–803. <https://doi.org/10.1109/78.193218>
3. Khachaturov V.R., Fedorkin Yu.A., Konoval'chik A.S. Influence of random phase errors of the receiving channels of the antenna array on the quality of resolution of external radiation sources. *Antenny = J. Antennas.* 2000;2:55–59 (in Russ.).
4. Ratynskii M.V. Characteristics analysis of super resolution direction finding algorithms. *Radiotekhnika = J. Radioengineering.* 1992;(10–11):63–66 (in Russ.).
5. Roy R., Kailath T. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing.* 1989;37(7):984–995. <https://doi.org/10.1109/29.32276>
6. Rao B.D., Hari K.V.S. Performance analysis of Root-Music. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing.* 1989;37(12):1939–1949. <https://doi.org/10.1109/29.45540>
7. Stoica P., Nehorai A. Performance comparison of subspace rotation and MUSIC methods for direction estimation. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing.* 1991;39(2):446–453. <https://doi.org/10.1109/78.80828>
8. Trifonov A.P., Shinakov Yu.S. *Sovmestnoe razlichenie signalov i otsenka ikh parametrov na fone pomekh (Joint discrimination of signals and estimation of their parameters on the background of interference).* Moscow: Radio i svyaz'; 1986. 264 p. (in Russ.).
9. Lagovsky B., Samokhin A., Shestopalov Y. Increasing effective angular resolution measuring systems based on antenna arrays. In: *2016 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS).* 2016. P. 432–434. <https://doi.org/10.1109/URSI-EMTS.2016.7571418>
10. Lagovsky B.A., Samokhin A.B. Superresolution in signal processing using a priori information. In: *Proceedings of the 2017 19th International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA).* 2017. P. 779–783. <https://doi.org/10.1109/ICEAA.2017.8065365>
11. Lagovsky B.A., Chikhina A.G. Superresolution in signal processing using a priori information. In: *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS).* 2017. P. 944–947. <https://doi.org/10.1109/PIERS.2017.8261879>
12. Lagovsky B.A., Samokhin A.B., Shestopalov Y.V. Creating two-dimensional images of objects with high angular resolution. In: *2018 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP).* 2018. P. 114–115. <https://doi.org/10.1109/APCAP.2018.8538220>
13. Lagovsky B., Samokhin A., Shestopalov Y. Angular superresolution based on a priori information. *Radio Science.* 2021;56(1):e2020RS007100. <https://doi.org/10.1029/2020RS007100>
14. Lagovsky B.A., Samokhin A.B. Achievement of angular superresolution based on the priority of known information. *Fizicheskie osnovy priboroostroeniya = Physical Bases of instrumentation.* 2019;8(4–34):16–22 (in Russ.). <https://doi.org/10.25210/jfop-1904-016022>
15. Lagovsky B.A., Chikhina A.G. Regression methods for obtaining a super resolution for a group goal. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki = Achievements of modern Radioelectronics.* 2020;1:69–76 (in Russ.).

Об авторах

Щукин Андрей Алексеевич, аспирант кафедры «Прикладная математика» Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: shchukin.a.a@edu.mirea.ru. ResearcherID CAG-1481-2022, <http://orcid.org/0000-0003-2849-0710>

Павлов Александр Евгеньевич, аспирант кафедры «Прикладная математика» Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: pavlov.a.e@edu.mirea.ru. ResearcherID CAG-1509-2022, <http://orcid.org/0000-0001-5967-9036>

About the authors

Andrey A. Shchukin, Postgraduate Student, Applied Mathematics Department, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: shchukin.a.a@edu.mirea.ru. ResearcherID CAG-1481-2022, <http://orcid.org/0000-0003-2849-0710>

Aleksandr E. Pavlov, Postgraduate Student, Applied Mathematics Department, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: pavlov.a.e@edu.mirea.ru. ResearcherID CAG-1509-2022, <http://orcid.org/0000-0001-5967-9036>

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 577.337; 538.931
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-44-54>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Коллективная динамика доменных структур в жидкокристаллических липидных бислоях

В.Н. Каданцев[®],
А.Н. Гольцов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[®] Автор для переписки, e-mail: appl.synergy@yandex.ru

Резюме

Цели. Многочисленные исследования биосистем указывают на особую роль квазиодномерных (квази-1D) молекулярных структур в процессах транспорта энергии, зарядов и информации. В этой связи особый интерес представляют исследования коллективной динамики квази-1D латеральных структур в жидкокристаллических (ЖК) мембранах и возможности передачи по таким структурам локальных возбуждений. С целью исследования молекулярных механизмов направленного транспорта энергии в ЖК липидных мембранах в настоящей работе разработана модель коллективной динамики квази-1D доменных структур (ДС) в ЖК бислоях, взаимодействующих с окружающей средой.

Методы. В качестве квази-1D ДС рассмотрены перколяционные ДС, формирующиеся при фазовом разделении липидных молекул в многокомпонентных мембранах. В модели выделены две взаимодействующие между собой подсистемы, различающиеся по своим структурным и динамическим свойствам: поверхность мембраны, образованная полярными группами (ПГ) липидных молекул и внутренняя гидрофильная область мембраны, сформированная ацильными цепями (АЦ) липидов. При моделировании подсистемы АЦ использован гамильтониан Гинзбурга – Ландау, учитывающий зависимость ее динамики от температуры вблизи температуры фазового перехода плавления липидов T_c .

Результаты. Анализ динамических состояний модели показал, что вблизи температур T_c в рассматриваемых квази-1D ДС могут существовать перемещающиеся с постоянной скоростью возбуждения в виде солитонов. При этом движение упругого возбуждения (кинка) вдоль ДС в области АЦ вызывает образование акустического солитона – области сжатия в подсистеме ПГ, перемещающейся согласованно с движением кинки. Область локализации солитона охватывает примерно 10 молекул и существенно зависит от параметра взаимодействия подсистем ПГ и АЦ. Движение солитона происходит с дозвуковой скоростью, которая определяется, в частности, величиной внешнего воздействия.

Выводы. В рамках разработанной модели показано, что ЖК ДС в липидных мембранах проявляют свойства активных сред, в которых может происходить формирование и перемещение локализованных упругих возбуждений в виде солитонов на макроскопических пространственных и временных масштабах. Предложенная модель молекулярного транспорта энергии вдоль квази-1D ДС может быть применена к описанию направленной передачи энергии по латеральным доменным каналам в биомембранах и кооперативного функционирования мембранных биоэнергетических и рецепторных комплексов.

Ключевые слова: коллективная динамика, жидкокристаллические доменные структуры, многокомпонентные липидные мембраны, солитоны, направленный транспорт энергии

• Поступила: 20.10.2021 • Доработана: 05.05.2022 • Принята к опубликованию: 20.06.2022

Для цитирования: Каданцев В.Н., Гольцов А.Н. Коллективная динамика доменных структур в жидкокристаллических липидных бислоях. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):44–54. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-44-54>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Collective dynamics of domain structures in liquid crystalline lipid bilayers

Vasiliy N. Kadantsev[@],
Alexey N. Goltsov

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

Abstract

Objectives. Numerous studies of biosystems indicate the distinct role of quasi-one-dimensional molecular structures in the transport of energy, charges, and information. Of particular interest are the studies on the collective dynamics of quasi-one-dimensional lateral structures in liquid crystalline membranes and the possibility of local excitation transfer through such structures. In this paper, we developed a model for the collective dynamics of quasi-one-dimensional domain structures in lipid bilayers interacting with the environment. The objective is to study the mechanisms of the directed energy transport in liquid crystalline lipid membranes.

Methods. In this paper, the percolation domain structures formed as a result of phase separation in multicomponent lipid membranes are considered to be quasi-one-dimensional domain structures. The model distinguishes two subsystems interacting with each other and differing in their structural and dynamic properties, i.e., the membrane surface formed by polar groups of lipid molecules and the internal hydrophilic region of the membrane formed by acyl chains of lipids. The acyl chain subsystem is simulated using the Ginzburg–Landau Hamiltonian which considers the dependence of its dynamics on temperature close to the lipid melting phase transition temperature T_c .

Results. Analysis of dynamic states has shown that elastic excitations moving at constant rate in the form of solitons may exist near temperatures T_c in the considered quasi-one-dimensional domain structures. In addition, motion of the elastic excitation region (kink) along domain structures in the acyl chain region causes the formation of acoustic soliton, i.e., the compression region in the polar group subsystem moving in concert with the kink displacement. The soliton localization region covers about 10 molecules and depends significantly on the interaction parameter of the polar group and acyl chain subsystems. Soliton moves at a subsonic speed determined, in particular, by the magnitude of an external force.

Conclusions. The model developed in this paper shows that liquid crystalline domain structures in lipid membranes exhibit properties of active media, wherein the formation and displacement of localized elastic excitations on macroscopic spatial and temporal scales may occur. The proposed molecular mechanism of the soliton transport along quasi-one-dimensional domain structures may be used for describing the directed energy transfer along lateral domain channels in biomembranes and the cooperative functioning of the membrane bioenergetic and receptor complexes.

Keywords: collective dynamics, liquid crystalline domain structures, multicomponent lipid membranes, soliton, directed energy transport

• Submitted: 20.10.2021 • Revised: 05.05.2022 • Accepted: 20.06.2022

For citation: Kadantsev V.N., Goltsov A.N. Collective dynamics of domain structures in liquid crystalline lipid bilayers. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):44–54. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-44-54>

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

Электрооптические и морфологические свойства жидкокристаллических (ЖК) планарных систем определяют их высокую чувствительность к внешним факторам, приводящим к быстрому изменению их макроскопических характеристик. Возникновение порогового коллективного отклика в нематических ЖК пленках на внешние воздействия лежит в основе их высокой структурной подвижности, что определяет их широкое применение в различных областях техники в качестве материалов с легко управляемыми свойствами. Уникальные свойства ЖК состояния вещества также обуславливают широкое распространение ЖК структур в живых системах и их важную биологическую роль [1]. Применение подходов физики ЖК и физики конденсированных сред к исследованиям ЖК состояний в живых клетках привели к развитию физики активных ЖК структур в живых системах, функционирующих вдали от равновесных состояний при наличии накачки и диссипации энергии [2].

К активным ЖК структурам в клетках относятся лиотропные ЖК клеточные мембраны, которые являются одними из их основных структурных и функциональных элементов. Кроме функций формирования клеточного компартмента, они выполняют активную роль в пространственной организации матрикса для встраивания сигнальных мембранных рецепторов и биоэнергетических белковых комплексов на поверхности мембраны, обеспечивая оптимальные условия их функционирования [1]. Благодаря высокой структурной подвижности ЖК состояний мембраны выполняют разнообразные коммуникационные функции, обеспечивая трансмембранный транспорт вещества и сигнальных молекул между клеткой и внешней средой. Также ЖК мембраны обеспечивают латеральный транспорт биологически активных молекул вдоль поверхности мембраны. Сложную пространственно-организующую роль играют митохондриальные мембраны в биоэнергетике клетки, обеспечивая кластерную организацию наноразмерных молекулярных машин дыхательного аппарата [3]. Предполагается, что функционирование активных ЖК мембран реализуется за счет возбуждения кооперативных молекулярных процессов, идущих в сложноорганизованных ЖК бислоях.

Сложная структура ЖК липидных мембран связана с их гетерогенной структурой, которая обусловлена разнообразным составом липидных молекул, различающихся как по молекулярной структуре, так и по их фазовому состоянию. Гетерогенная структура мембран проявляется в их доменной организации, которая определяет многие физиологические свойства биомембран [1]. Во-первых, отмечается роль доменной организации мембраны в формировании специфического липидного микроокружения мембранных белков, которое обеспечивает их оптимальное функционирование. Показано, что разрушение доменных структур (ДС) приводит к нарушению функционирования системы мембранных белков [4]. Во-вторых, отмечается роль ДС в транспортных и коммуникационных процессах, идущих на поверхности мембран [5]. Здесь, в частности, рассматриваются квазиодномерные (квази-1D) перколяционные кластерные сети, формирующиеся в области фазового разделения липидных молекул, различающихся по своей структуре и фазовому состоянию [6]. Предполагается, что квази-1D ДС и их сети могут выполнять роль латеральных каналов для направленного транспорта энергии и зарядов по поверхности мембраны и обеспечивать взаимодействие между мембранными биоэнергетическими и рецепторными комплексами [5]. Направленный транспорт и каналирование энергии и зарядов по квази-1D ДС по своей эффективности могут превосходить пассивный транспорт, реализующийся за счет двумерной диффузии молекул по поверхности мембраны.

С целью исследования механизмов направленного транспорта энергии по ЖК ДС в настоящей работе развивается модель коллективной динамики квази-1D ДС в липидных бислоях, взаимодействующих с окружающей средой. Показывается, что в системе ДС возможны нелинейные возбуждения, способные осуществлять взаимодействие и перенос энергии между мембранными белками и рецепторами на значительных расстояниях. В результате аналитического исследования установлено, что при учете взаимодействия липидных молекул друг с другом и окружением в рассматриваемых квази-1D латеральных ДС в липидных бислоях могут существовать возбуждения типа акустических солитонов, которые представляют собой перемещающиеся с постоянной скоростью области сжатия (разряжения).

1. МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ДОМЕННЫХ ЛИПИДНЫХ СТРУКТУР

Рассмотрим одномерную цепочку липидных молекул, образующих квази-1D домен в плоской мембране. Выделим в структуре липидной мембраны две подсистемы: поверхность мембраны, образованную полярными группами (ПГ) липидных молекул и внутреннюю гидрофобную область мембраны, сформированную ацильными цепями (АЦ) липидов. Так как области ПГ и АЦ обладают различными свойствами и участвуют в разных молекулярных возбуждениях, запишем отдельно гамильтонианы невзаимодействующих подсистем ПГ и АЦ и далее введем энергию взаимодействия между ними. Гамильтониан взаимодействия между собой ПГ липидных молекул в гармоническом приближении представим в виде:

$$H_1 = \sum_n \frac{1}{2} m \left[\dot{p}_n^2 + \Omega_0^2 p_n^2 + \Omega_1^2 (p_{n+1} - p_n)^2 \right], \quad (1)$$

где p_n – смещения n -й ПГ относительно равновесного положения ПГ, находящихся на расстоянии a друг от друга; m – масса ПГ; Ω_0 и Ω_1 – характеристические частоты колебаний в системе ПГ. Последний член в уравнении (1) учитывает дисперсию упругих волн в цепочке ПГ. Точка обозначает дифференцирование по времени t .

Динамика подсистемы АЦ существенно зависит от температуры T мембраны. Вблизи температуры фазового перехода T_c в мембранах наблюдается фазовый переход – плавление липидов, который происходит путем поворотной изомеризации АЦ липидных молекул (конформационное плавление) и приводит к возрастанию их подвижности [1]. Поэтому для описания динамики цепочки АЦ наиболее подходящим является гамильтониан типа Гинзбурга – Ландау, широко используемый для исследований критических явлений в различных структурах, в том числе для описания коллективной динамики липидных мембран [7, 8]:

$$H_2 = \sum_n \frac{1}{2} M \left[\dot{u}_n^2 + \omega^2 (u_{n+1} - u_n)^2 \right] + U_T(u_n) \quad (2)$$

с двухямным потенциалом

$$U_T(u_n) = \frac{1}{2} G u_n^2 + \frac{1}{4} B u_n^4, \quad (3)$$

где параметры $G < 0$ и $B > 0$ при $T < T_c$ и $G > 0$ и $B > 0$ при $T > T_c$. M – масса АЦ. Переменная u_n характеризует мгновенное положение n -й АЦ относительно равновесного положения, соответствующего вершине потенциального барьера. $\omega^2 = K/M$, где K – модуль упругости мембраны.

В уравнении (3) зависимость параметра G от температуры может быть представлена следующим образом:

$$G(T) = E_0(T/T_c - 1), \quad (4)$$

где E_0 – высота потенциального барьера [9]. Область температур вблизи T_c составляет несколько градусов [1]. Двухямный симметричный потенциал (3) имеет два минимума, расположенные на расстоянии от вершины барьера

$$u_0 = \pm \sqrt{\frac{|G|}{B}}. \quad (5)$$

В высокотемпературной области при $T \gg T_c$ для гамильтониана подсистемы АЦ справедливо гармоническое представление:

$$H'_2 = \sum_n \frac{1}{2} M \left[\dot{u}_n^2 + \omega^2 (u_{n+1} - u_n)^2 \right]. \quad (6)$$

Гамильтониан взаимодействия ПГ и АЦ, который учитывает изменение конформации ближайших АЦ при смещении ПГ из устойчивого положения равновесия, представим в виде [8]:

$$H_3 = \sum_n \chi p_n (u_n^2 - u_0^2), \quad (7)$$

где χ – константа взаимодействия, зависящая в общем случае от структуры липидных молекул и характера окружения мембраны.

Переходя от дискретного к континуальному приближению в описании динамики квази-1D латеральной структуры в мембране, получим следующее выражение для гамильтониана системы:

$$H_M = \frac{1}{a} \int \frac{M}{2} (u_t^2 + c_0^2 u_x^2) + U_T(u) + \frac{m}{2} (p_t^2 + \Omega_0^2 p^2 + V_0^2 p_x^2) + \chi p (u^2 - u_0^2) dx, \quad (8)$$

где $c_0 = a\omega_1$ – скорость звука в подсистеме АЦ; $V_0 = a\Omega_1$.

При температурах $T < T_c$ потенциальная функция $U_T(u)$ (3) имеет вид:

$$U_T(u) = \frac{1}{2} |G(T)| u^2 + \frac{1}{4} B u^4. \quad (9)$$

Система уравнений движения для связанной системы ПГ и АЦ с гамильтонианом H_M (8) записывается следующим образом:

$$M u_{tt} - M c_0^2 u_{xx} - |G| u + B u^3 + 2 \chi p u = f_u, \quad (10)$$

$$Mp_{tt} + \Omega_0^2 p - V_0^2 p_{xx} + \chi(u^2 - u_0^2) = 0. \quad (11)$$

При учете взаимодействия двух основных подсистем ПГ и АЦ с физическими полями окружения в уравнения (10) и (11) следует добавить члены, учитывающие вязкое трение и внешние воздействия:

$$Mu_{tt} - Mc_0^2 u_{xx} - M\Gamma_u u_t - |G|u + Bu^3 + 2\chi pu = f_u, \quad (12)$$

$$Mp_{tt} + \Omega_0^2 p - M\Gamma_p p_t - V_0^2 p_{xx} + \chi(u^2 - u_0^2) = f_p. \quad (13)$$

где $\Gamma_u > 0$ и $\Gamma_p > 0$ – коэффициенты вязкого трения в подсистемах ПГ и АЦ, $f_u > 0$ и $f_p > 0$ – правые части уравнений, учитывающие внешние и внутренние силы, действующие на каждую из подсистем. В качестве внутренних сил могут выступать силы упругих напряжений, действующие на границах раздела фаз (доменов). Рассматриваемые в модели квази-1D ДС структуры, формирующиеся в результате фазового разделения, находятся либо под влиянием сил сжатия, либо испытывают растяжение в зависимости от липидного состава мембраны и типа межфазной границы.

2. ДИНАМИКА КВАЗИОДНОМЕРНЫХ ДОМЕННЫХ СТРУКТУР ЛИПИДНЫХ МОЛЕКУЛ

Рассмотрим уравнения движения (11) и (12) без учета взаимодействия между подсистемами ПГ, АЦ и окружающей средой. Тогда уравнение (11) для динамики АЦ переходит в хорошо известное уравнение теории Гинзбурга – Ландау:

$$Mu_{tt} - Mc_0^2 u_{xx} - |G|u + Bu^3 = 0. \quad (14)$$

В малоамплитудном пределе $u(x, t)$ описывает малые смещения $\delta u(x, t)$ АЦ вблизи одного из равновесных положений $u(x, t) = \pm u_0 + \delta u(x, t)$. В первом приближении по $\delta u(x, t)$ такие смещения описываются уравнением

$$M\delta u_{tt} - Mc_0^2 \delta u_{xx} - |G|\delta u = 0, \quad (15)$$

которое имеет фундаментальное решение:

$$\delta u(x, t) \sim e^{i(\omega t - kx)}. \quad (16)$$

Дисперсия упругих волн определяется следующим выражением:

$$\omega^2 = \frac{|G|}{M} + c_0^2 k^2 = \omega_0^2 + c_0^2 k^2, \quad (17)$$

где k – волновой вектор.

Кроме того, уравнение (15) имеет решение в виде уединенной волны немалой амплитуды:

$$u(x, t) = \mp u_0 \tanh \left(\frac{\omega_0}{\sqrt{c_0^2 - V^2}} (x - Vt) \right). \quad (18)$$

Здесь верхний знак соответствует перемещающемуся со скоростью $V < c_0$ солитону (кинку), а нижний – антикинку. Ширина солитона (кинка или антикинка) определяется соотношением:

$$\Delta_0 = \frac{\sqrt{c_0^2 - V^2}}{\omega_0} = \sqrt{\frac{M(c_0^2 - V^2)}{|G|}},$$

где $\omega_0 = (|G|/M)^{1/2}$.

Уравнения (12) и (13) в отсутствие взаимодействия подсистем ПГ и АЦ друг с другом и с окружением описывают продольные (звуковые) волны с дисперсией

$$\Omega^2(q) = \Omega_0^2 + V_0^2 q^2, \quad (19)$$

где q – волновой вектор.

Рассмотрим динамику квази-1D латеральной структуры липидов при учете взаимодействия подсистем ПГ и АЦ между собой, которая описывается системой уравнений (12) и (13). При этом пренебрежем коэффициентом вязкого трения Γ_u в подсистеме ПГ, а также примем, что внешнее воздействие на подсистему ПГ мало, так что можно пренебречь вызываемыми ими смещениями ПГ. Переходя в уравнениях (12) и (13) к новой пространственной переменной $\xi = x - Vt$, получим систему двух обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$M(V^2 - c_0^2)u_{\xi\xi} - M\Gamma_u u_{\xi} - |G|u + Bu^3 + 2\chi pu = f_u, \quad (20)$$

$$M(V^2 - V_0^2)p_{\xi\xi} + m\Omega_0^2 p + \chi(u^2 - u_0^2) = 0. \quad (21)$$

Особый интерес представляет случай перемещения возбуждения по рассматриваемой структуре с постоянной скоростью $V = V_0$. Тогда из уравнения (21) следует:

$$p = -\frac{\chi}{m\Omega_0^2} (u^2 - u_0^2). \quad (22)$$

Подставляя это соотношение в уравнение (20) с учетом выражения для u_0 (5), получим уравнение, описывающее динамику возбуждения в подсистеме АЦ в виде:

$$M(V^2 - c_0^2)u_{\xi\xi} - M\Gamma_u u_{\xi} - G_1 u + B_1 u^3 = f_u, \quad (23)$$

где

$$G_1 = \theta |G|, \quad B_1 = \theta |B|, \quad \theta = 1 - \frac{\chi^2}{m\Omega_0^2 B}, \quad 0 < \theta < 1.$$

Перейдем в уравнении (23) к новым переменным

$$z = \frac{\xi}{L} = \frac{\sqrt{2}\xi}{\Delta} \quad \text{и} \quad \eta = \frac{u}{u_0},$$

где Δ – ширина области локализации возбуждения. Тогда уравнение, описывающее состояние возбуждения в подсистеме АЦ липидных молекул, принимает вид:

$$\eta_{zz} + \mu\eta_z - \eta + \eta^3 - \lambda = 0, \quad (24)$$

где

$$\mu = V\Gamma_u \sqrt{\frac{M}{(c_0^2 - V^2)G_1}}, \quad (25)$$

$$\lambda = f_u \sqrt{\frac{B_1}{G^3}}. \quad (26)$$

Решение уравнения (24) может быть представлено с помощью корней полинома [9]:

$$\Phi(\eta) = -\eta + \eta^3 - \lambda = (\eta - \eta_1)(\eta - \eta_2)(\eta - \eta_3). \quad (27)$$

Здесь величины $\eta_1 < \eta_2 < \eta_3$ удовлетворяют следующим соотношениям:

$$\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 = 0, \quad \eta_1\eta_2 + \eta_2\eta_3 + \eta_1\eta_3 = -1, \quad \eta_1\eta_2\eta_3 = \lambda$$

и определяют стационарные состояния системы:

$$u_1(x, t) = \eta_1 u_0, \quad u_2(x, t) = \eta_2 u_0, \quad u_3(x, t) = \eta_3 u_0. \quad (28)$$

Кроме того, уравнение (24) имеет решение, которое описывает перемещающееся с постоянной скоростью возбуждение в виде уединенной волны (немалой амплитуды), при условии, что

$$\mu = \pm \frac{3\eta_3}{\sqrt{2}}. \quad (29)$$

Указанное решение в переменных u , x и t имеет вид [9]

$$u(x, t) = \pm u_0 \left(\eta_1 + \frac{\eta_2 - \eta_1}{1 + \exp \frac{x - Vt}{\Delta}} \right), \quad (30)$$

где

$$\Delta = \frac{\sqrt{2M(c_0^2 - V^2)}}{\sqrt{G_1(\eta_3 - \eta_1)}}. \quad (31)$$

Знак «минус» в выражении (30) соответствует кинке ($\eta < 0$), а знак «плюс» – антикинке. Соотношения (25) и (26) определяют связь между скоростью солитона и внешним полем в виде:

$$V^2 = \frac{9c_0^2 G_1 \eta_3^2}{2M\Gamma_1^2 + 9G_1 \eta_3^2} = V_0 < c_0^2. \quad (32)$$

Скорость солитона V всегда меньше c_0 из-за того, что ускоряясь под действием внешней силы, солитон излучает волны, что приводит к дополнительным потерям энергии (диссипации), не учтенной в уравнении (23) и соотношении (32), согласно которому с уменьшением f_u (при $f_u \rightarrow 0$) $V \rightarrow c_0$. Направление распространения возбуждения (солитона) определяется знаком f_u .

Перемещение возбуждения (кинка) в подсистеме АЦ вызывает образование области сжатия (разряжения) в подсистеме ПГ, перемещающейся согласованно с перемещением кинка в подсистеме АЦ. Пространственно-временная структура области деформации в системе ПГ определяется выражением, вытекающим из соотношений (22) и (30):

$$p(x, t) = \frac{\chi u_0^2}{m\Omega_0^2} \left[\left(\frac{\eta_1 \exp \frac{x - Vt}{\Delta} + \eta_2}{1 + \exp \frac{x - Vt}{\Delta}} \right)^2 - 1 \right]. \quad (33)$$

При фиксированном значении параметра $V = V_0$ решение системы уравнений (10) и (11) имеет вид:

$$u(x, t) = \mp u_0 \tanh \frac{x - Vt}{\Delta}, \quad (34)$$

$$p(x, t) = \frac{\chi u_0^2}{m\Omega_0^2} \operatorname{sech}^2 \frac{x - Vt}{\Delta}. \quad (35)$$

На рисунке представлены результаты расчетов для смещения АЦ $u(x, t)$ (34) и ПГ $p(x, t)$ (35) липидных молекул в квази-1D ДС мембраны. Расчеты выполнены для параметров, полученных на основе следующих экспериментальных данных. Оценка характерной частоты $\Omega_0 = 10^{11}$ Гц проведена на основе экспериментальных данных для осцилляций диполей ПГ [8]. В качестве оценки скорости звука взято значение $c_0 = 200$ м/с из интервала значений, полученного в экспериментах по измерению скорости звука в липидных монослоях [7]. Величина

$u_0 = 1.1$ нм оценена на основе экспериментальных данных для среднего угла наклона АЦ (34° – 41°) в L_β фазе в лицитиновых липосомах [10]. Значение ширины кинка $\Delta = 8.0$ нм оценено, исходя из данных по размерам области дефектов, формирующихся в подсистеме АЦ липидных мембран при температурах, близких к температуре главного фазового перехода (область температуры предперехода) [10]. При расчетном значении ширины Δ область солитона охватывает приблизительно 10 липидных молекул. Решение в виде кинка для смещения АЦ $u(x, t)$ описывает дефект типа дислокации, формирующийся в подсистеме АЦ. Отрицательные и положительные значения $u(x, t)$ соответствуют отклонениям АЦ липидных молекул в противоположных направлениях. Решение в виде солитона для смещения ПГ $p(x, t)$ описывает деформацию сжатия в подсистеме ПГ, вызванную дефектом в АЦ.

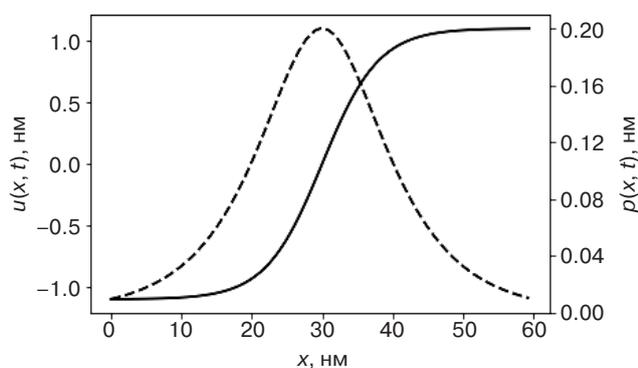


Рисунок. Смещения АЦ $u(x, t)$ (34) (сплошная кривая) и ПГ $p(x, t)$ (35) (пунктирная кривая) липидных молекул в квази-1D ДС мембраны

Сравнивая выражения для ширины солитона Δ (18) и (31), полученные без учета взаимодействия ПГ и АЦ, можно видеть, что взаимодействие подсистем ПГ и АЦ приводит к увеличению области возбуждения (ширины кинка или антикинка) в $\sqrt{\theta}$ раз. Таким образом, с ростом параметра взаимодействия χ понижается потенциальный барьер $E = \theta E_0$ и увеличивается область автолокализации возбуждения.

С увеличением температуры в области температур ниже T_c значение параметра $G(T)$ (4), определяющего высоту барьера в потенциале $U_T(u_n)$ (3), уменьшается и при $T > T_c$ сохраняется лишь один минимум, и бистабильность в системе исчезает. Понижение $G(T)$ приводит к уменьшению пространственного размера солитона.

Таким образом, степень локализации возбуждения в одномерной структуре липидов мембраны возрастает при приближении температуры к T_c . Это связано с ростом эффективной силы λ (26) в уравнении (24), которая увеличивается с ростом температуры как $|T - T_c|^{-1.5}$ до максимального значения,

определяемого соотношением (26). При этом, как уже отмечалось, знак внешней силы определяет направление распространения возбуждения вдоль квазилинейных ДС в мембране. Кроме того, под действием внешнего поля солитон становится асимметричным.

С увеличением температуры T , а, следовательно, и эффективной силы λ (26) возрастает и скорость перемещения солитона по цепочке липидов. При значениях температуры, близких к той, при которой $\lambda = \lambda_{\max}$, локализованное состояние начинает разрушаться и формируется периодическая пространственно-временная структура типа кноидальной волны.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Многочисленные теоретические исследования в биофизике указывают на особую роль квазиодномерных регулярных молекулярных структур в биосистемах в процессах транспорта энергии, вещества и информации на значительные по молекулярным масштабам расстояниям [11–13]. В этом направлении исследований рассматриваются главным образом транспорт энергии и зарядов вдоль линейных молекул, таких как ДНК, полипептиды и линейные полимеры [14–16]. В этой связи особый интерес представляют исследования коллективной динамики квазиодномерных латеральных структур в многокомпонентных биологических мембранах и возможности передачи по таким структурам локальных возбуждений, обусловленных физическими и химическими воздействиями на отдельные компоненты мембран. Этот интерес определен чрезвычайно важной ролью биологических мембран в живых клетках. Предполагается, что природа кооперативных свойств биологических мембран определяется взаимодействием ее субъединиц (рецепторов и ионных каналов), осуществляемым через такие квазиодномерные структуры в липидных бислоях [5].

В данной работе проведено теоретическое исследование коллективной динамики квазиодномерных доменных структур в жидкокристаллических липидных мембранах. В качестве квази-1D ДС в мембранах в работе рассматриваются квази-1D структуры липидных молекул, формирующиеся в процессе латеральной доменной организации бислоя. Существование таких структур в клеточных мембранах подтверждается различными экспериментальными методами: дифракцией рентгеновских лучей, методом нейтронного рассеяния, электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и электронной микроскопией в многокомпонентных липидных бислоях [6, 17, 18], а также путем численного моделирования ДС в липидных мембранах. Компьютерное

моделирование показало, что самоорганизация перколяционной ДС может реализоваться в результате фазового разделения в двухкомпонентных мембранах, образованных липидными молекулами, различающимися по своим структурным и физическим свойствам [19, 20].

В разработанной модели динамики квази-1D ДС рассмотрены две взаимодействующие между собой подсистемы в липидных бислоях: поверхность мембраны, образованная ПГ липидных молекул, и внутренняя гидрофобная область мембраны, состоящая из АЦ липидов. В модели учтено, что динамика подсистемы АЦ существенно зависит от температуры T в области температуры T_c фазового перехода плавления липидов [1]. Поэтому для описания динамики гидрофобной области АЦ липидов выбран гамильтониан типа Гинзбурга – Ландау, широко используемый при исследовании критических явлений. В результате аналитического исследования в работе показано, что при учете взаимодействия двух подсистем друг с другом и окружением в рассматриваемых квази-1D латеральных структурах липидов могут существовать перемещающиеся с постоянной скоростью упругие возбуждения в виде уединенных волн (немалой амплитуды). Формирование и перемещение дефекта (дислокации) в подсистеме АЦ вызывает образование акустического солитона – области сжатия в подсистеме ПГ липидов, перемещающейся согласованно с перемещением дефекта (кинка) в подсистеме АЦ. Таким образом, образовавшиеся в квази-1D ДС возбуждения солитонного типа представляют собой перемещающиеся вдоль молекулярной структуры области локальных смещений ПГ липидов и структурных дефектов в подсистеме АЦ. С увеличением температуры T (при неизменном внешнем воздействии) скорость перемещения солитона по цепочке липидных молекул и степень его локализации возрастают. Однако при некотором значении температуры, близком к температуре плавления T_c , локализованное состояние начинает разрушаться, и формируется периодическая пространственная структура типа кноидальной волны. Как мы полагаем, подобная периодическая структура может быть соотнесена с P_β фазой, наблюдаемой в липидных бислоях в области температуры ниже температуры главного фазового перехода [10]. Следует также отметить, что при $T < T_c$ в рассматриваемой квази-1D ДС могут существовать возмущения в виде волн малой амплитуды (малоамплитудных фононов), частота которых убывает с увеличением температуры до нуля при $T = T_c$ («мягкая мода») [21].

Экспериментальные данные по наблюдению возбуждений солитонного типа в липидных бислоях были получены в ряде экспериментов с применением различных методов возбуждения и регистрации

упругих импульсов. В эксперименте с оптической генерацией упругих волн в липидных монослоях было зарегистрировано возбуждение акустических солитонно-подобных импульсов, формирующихся и распространяющихся с сохранением формы, при значениях поверхностного давления выше определенной пороговой величины [22]. Упругие возбуждения солитонного типа также наблюдались в липидных липосомах в области температуры плавления липидов [23]. Формирование и движение солитонов были также обнаружены и исследованы в нематических и холестерических ЖК планарных структурах методами нелинейной оптики при различных экспериментальных условиях [24, 25]. Экспериментально было показано, что формирование солитонов (доменных стенок малой ширины) происходит в магнитном поле или под действием сдвиговых напряжений в определенном диапазоне величин. Теоретическое описание формирования и движения солитона в нематических ЖК планарных структурах было проведено в рамках теории Эриксона – Лесли для нематического состояния [24]. В настоящей работе установлено, что аналогичные возбуждения солитонного типа могут возникать в лиотропных ЖК ДС в липидных мембранах.

Описанный механизм формирования локальной области упругой деформации и ее перемещения в виде солитона рассматриваются как возможный молекулярный механизм направленного транспорта упругой энергии по поверхности ЖК мембран. Захват солитона мембранными белковыми комплексами (рецепторами, ионными каналами) приводит к передаче упругой энергии белковой молекуле, что может являться триггером к их конформационным переходам и их активации [26]. Также предполагается, что возбуждение и распространение импульса упругой деформации в форме солитона может сопровождать распространение нервного импульса в аксоне [23].

Формирование и перемещение области локальной деформации в мембране может также приводить к захвату заряда солитоном и движению заряда вместе с ним. Механизм захвата и обусловленный им процесс транспорта заряда акустическим солитоном по одномерным молекулярным структурам обсуждались в работах [13, 27, 28]. Аналогичным образом в результате захвата зарядов и их перемещения солитонами в квази-1D ДС липидных мембран может осуществляться латеральный транспорт в клеточных мембранах. Возможность транспорта частиц солитонами была подтверждена в экспериментах по изучению солитонов в планарных холестерических ЖК структурах [25]. В этой работе было обнаружено, что солитон, соответствующий локальному дефекту в ЖК структуре, является областью притяжения для

частиц примесей, что приводит к захвату частиц и их транспорту движущимся солитоном. Дальнейшее развитие и применение разработанной модели к описанию солитонного транспорта частиц в ЖК мембранах будет рассмотрено в следующей публикации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование динамических свойств ЖК доменных структур липидных мембран, выполненное в данной работе, показало, что такие структуры проявляют свойства активных сред, в которых происходит формирование локализованных когерентных возбуждений на макроскопических пространственных и временных масштабах. Процесс образования локализованных возбуждений солитонного типа в квазилинейных доменных структурах представляет собой формирование области локальной деформации в системе полярных групп и образования топологических дефектов в системе ацильных цепей липидных молекул. В результате моделирования показано, что вдоль квазидоменной ДС возможно

движение солитона, которое представляет собой бездиссипативное перемещение локальной области деформации в цепочке полярных групп липидов, сопровождающееся согласованным движением дефекта (кинка) в области ацильных цепей липидных молекул. Предложенный молекулярный механизм может быть применен для описания процесса направленной передачи упругой энергии вдоль ЖК мембран и кооперативного поведения мембранных биоэнергетических комплексов. Дальнейшее развитие настоящей модели направлено на описание молекулярных механизмов захвата частиц движущимися солитонами и направленного транспорта заряженных частиц (протонов и электронов) по квазилинейным доменным структурам в биологических и искусственных полимерных мембранах.

Вклад авторов. Авторы внесли равный вклад в подготовку, написание и редактирование данной статьи.

Authors' contribution. The authors equally contributed to the preparing, writing, and editing the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геннис Р. Биомембраны: молекулярная структура и функции. М.: Мир; 1997. 624 с. ISBN 5-03-002419-0
2. Zhao J., Gulun U., Horie T., et al. Advances in biological liquid crystals. *Small*. 2019;15(18):1900019. <https://doi.org/10.1002/sml.201900019>
3. Нестеров С.В., Чесноков Ю.М., Камышинский Р.А., Ягузинский Л.С., Васильев Р.Г. Определение расположения и структуры АТФ-синтазы в мембранах митохондрий сердца крыс с помощью криоэлектронной томографии. *Российские нанотехнологии*. 2020;15(1):93–100. <https://doi.org/10.1134/S1992722320010136>
4. Zhou Y., Prakash P., Liang H., Cho K.J., Gorfé A.A., Hancock J.F. Lipid-sorting specificity encoded in K-ras membrane anchor regulates signal output. *Cell*. 2017;168(1–2):239–251.e16. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.11.059>
5. Marsh D. Connectivity of membrane domains. *Biophys. J.* 1993;64(2):299–300. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(93\)81368-7](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(93)81368-7)
6. Vaz W.L.C. Percolation properties of two-component, two-phase phospholipid bilayers. *Mol. Membr. Biol.* 1995;12(1):39–43. <https://doi.org/10.3109/09687689509038493>
7. Griesbauer J., Wixforth A., Schneider M.F. Wave propagation in lipid monolayers. *Biophys. J.* 2009;97(10):2710–2716. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2009.07.049>
8. Bolterauer H., Tuszyński J.A., Sataric M.V. Fröhlich and Davydov regimes in the dynamics of dipolar oscillations of biological membranes. *Phys. Rev. A*. 1991;44(2):1366–1381. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.44.1366>

REFERENCES

1. Gennis R. *Biomembrany: molekulyarnaya struktura i funktsii (Biomembranes: molecular structure and function)*. Moscow: Mir; 1997. 624 p. (in Russ.). ISBN 5-03-002419-0
[Gennis R. *Biomembranes: Molecular Structure and Function*. New York: Springer; 1989. 533 p.]
2. Zhao J., Gulun U., Horie T., et al. Advances in biological liquid crystals. *Small*. 2019;15(18):1900019. <https://doi.org/10.1002/sml.201900019>
3. Nesterov S.V., Chesnokov Y.M., Kamyshinsky R.A., Yaguzhinsky L.S., Vasilov R.G. Determining the structure and location of the ATP synthase in the membranes of rat's heart mitochondria using cryoelectron tomography. *Nanotechnol. Russia*. 2020;15(1):83–89 (in Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1995078020010139>
[Original Russian Text: Nesterov S.V., Chesnokov Y.M., Kamyshinsky R.A., Yaguzhinsky L.S., Vasilov R.G. Determining the structure and location of the ATP synthase in the membranes of rat's heart mitochondria using cryoelectron tomography. *Rossiiskie nanotekhnologii*. 2020;15(1):93–100 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1992722320010136>]
4. Zhou Y., Prakash P., Liang H., Cho K.J., Gorfé A.A., Hancock J.F. Lipid-sorting specificity encoded in K-ras membrane anchor regulates signal output. *Cell*. 2017;168(1–2):239–251.e16. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.11.059>
5. Marsh D. Connectivity of membrane domains. *Biophys. J.* 1993;64(2):299–300. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(93\)81368-7](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(93)81368-7)

9. Collins M.A. Solitons in chemical physics. In: *Advances in Chemical Physics*. 2007;53:225–339. <https://doi.org/10.1002/9780470142776.ch3>
10. Wack D.C., Webb W.W. Synchrotron x-ray study of the modulated lamellar phase P_{β} in the lecithin-water system. *Phys. Rev. A*. 1989;40(5):2712–2730. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.40.2712>
11. Davydov A.S. *Solitons in Molecular Systems*. Dordrecht: SpringerNetherlands; 1985. 317p. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3025-9>
12. Scott A.C. Dynamics of Davydov solitons. *Phys. Rev. A*. 1982;26(1):578. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.26.578>
13. Lupichev L.N., Savin A.V., Kadantsev V.N. *Synergetics of Molecular Systems*. Springer Series in Synergetics. Springer International Publishing; 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08195-3>
14. Yakushevich L.V., Savin A.V., Manevitch L.I. Nonlinear dynamics of topological solitons in DNA. *Phys. Rev. E*. 2002;66(1):016614. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.66.016614>
15. Каданцев В.Н., Гольцов А.Н. Коллективные возбуждения в альфа-спиральной молекуле белка. *Российский технологический журнал*. 2018;6(2):32–45. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2-32-45>
16. Kadantsev V.N., Goltsov A. Collective excitations in α -helical protein structures interacting with the water environment. *Electromagn. Biol. Med.* 2020;39(4):419–432. <https://doi.org/10.1080/15368378.2020.1826961>
17. Meder D., Moreno M.J., Verkade P., Vaz W.L.C., Simons K. Phase coexistence and connectivity in the apical membrane of polarized epithelial cells. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2006;103(2):329–334. <https://doi.org/10.1073/pnas.0509885103>
18. Risović D., Frka S., Kozarac Z. The structure of percolating lipid monolayers. *J. Colloid Interface Sci.* 2012;373(1):116–121. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.12.009>
19. Jørgensen K., Mouritsen O.G. Phase separation dynamics and lateral organization of two-component lipid membranes. *Biophys. J.* 1995;69(3):942–954. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(95\)79968-4](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(95)79968-4)
20. Goltsov A.N. Electromagnetic-field-induced oscillations of the lipid domain structures in the mixed membranes. *Bioelectrochem. Bioenerg.* 1999;48(2):311–316. [https://doi.org/10.1016/S0302-4598\(99\)00040-9](https://doi.org/10.1016/S0302-4598(99)00040-9)
21. Salari V., Tuszynski J., Rahnama M., Bernroider G. Plausibility of quantum coherent states in biological systems. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2011;306(1):012075. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/306/1/012075>
22. Shrivastava S., Schneider M.F. Evidence for two-dimensional solitary sound waves in a lipid controlled interface and its implications for biological signalling. *J. R. Soc. Interface.* 2014;11(97):20140098. <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.0098>
23. Heimburg T., Jackson A.D. On soliton propagation in biomembranes and nerves. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2005;102(28):9790–9795. <https://doi.org/10.1073/pnas.0503823102>
24. Lei L., Changqing S., Juelian S., Lam P.M., Yun H. Soliton propagation in liquid crystals. *Phys. Rev. Lett.* 1982;49(18):1335. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1335>
6. Vaz W.L.C. Percolation properties of two-component, two-phase phospholipid bilayers. *Mol. Membr. Biol.* 1995;12(1):39–43. <https://doi.org/10.3109/09687689509038493>
7. Griesbauer J., Wixforth A., Schneider M.F. Wave propagation in lipid monolayers. *Biophys. J.* 2009;97(10):2710–2716. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2009.07.049>
8. Bolterauer H., Tuszyński J.A., Sataric M.V. Fröhlich and Davydov regimes in the dynamics of dipolar oscillations of biological membranes. *Phys. Rev. A*. 1991;44(2):1366–1381. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.44.1366>
9. Collins M.A. Solitons in chemical physics. In: *Advances in Chemical Physics*. 2007;53:225–339. <https://doi.org/10.1002/9780470142776.ch3>
10. Wack D.C., Webb W.W. Synchrotron x-ray study of the modulated lamellar phase P_{β} in the lecithin-water system. *Phys. Rev. A*. 1989;40(5):2712–2730. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.40.2712>
11. Davydov A.S. *Solitons in Molecular Systems*. Dordrecht: SpringerNetherlands; 1985. 317p. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3025-9>
12. Scott A.C. Dynamics of Davydov solitons. *Phys. Rev. A*. 1982;26(1):578. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.26.578>
13. Lupichev L.N., Savin A.V., Kadantsev V.N. *Synergetics of Molecular Systems*. Springer Series in Synergetics. Springer International Publishing; 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08195-3>
14. Yakushevich L.V., Savin A.V., Manevitch L.I. Nonlinear dynamics of topological solitons in DNA. *Phys. Rev. E*. 2002;66(1):016614. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.66.016614>
15. Kadantsev V.N., Goltsov A.N. Collective excitations in alpha-helical protein molecule. *Russian Technological Journal*. 2018;6(2):32–45 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2-32-45>
16. Kadantsev V.N., Goltsov A. Collective excitations in α -helical protein structures interacting with the water environment. *Electromagn. Biol. Med.* 2020;39(4):419–432. <https://doi.org/10.1080/15368378.2020.1826961>
17. Meder D., Moreno M.J., Verkade P., Vaz W.L.C., Simons K. Phase coexistence and connectivity in the apical membrane of polarized epithelial cells. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2006;103(2):329–334. <https://doi.org/10.1073/pnas.0509885103>
18. Risović D., Frka S., Kozarac Z. The structure of percolating lipid monolayers. *J. Colloid Interface Sci.* 2012;373(1):116–121. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.12.009>
19. Jørgensen K., Mouritsen O.G. Phase separation dynamics and lateral organization of two-component lipid membranes. *Biophys. J.* 1995;69(3):942–954. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(95\)79968-4](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(95)79968-4)
20. Goltsov A.N. Electromagnetic-field-induced oscillations of the lipid domain structures in the mixed membranes. *Bioelectrochem. Bioenerg.* 1999;48(2):311–316. [https://doi.org/10.1016/S0302-4598\(99\)00040-9](https://doi.org/10.1016/S0302-4598(99)00040-9)
21. Salari V., Tuszynski J., Rahnama M., Bernroider G. Plausibility of quantum coherent states in biological systems. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2011;306(1):012075. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/306/1/012075>

25. Shen Y., Dierking I. Dynamics of electrically driven solitons in nematic and cholesteric liquid crystals. *Commun. Phys.* 2020;3(1):14. <https://doi.org/10.1038/s42005-020-0288-4>
26. Cavallo F., De Giovanni C., Nanni P., Forni G., Lollini P.-L. 2011: the immune hallmarks of cancer. *Cancer Immunol. Immunother.* 2011;60(3):319–326. <https://doi.org/10.1007/s00262-010-0968-0>
27. Žmuidzinis J.S. Electron trapping and transport by supersonic solitons in one-dimensional systems. *Phys. Rev. B.* 1978;17(10):3919. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.17.3919>
28. Каданцев В.Н., Гольцов А.Н., Кондаков М.А. Динамика электросолитона в термализованной молекулярной цепи. *Российский технологический журнал.* 2020;8(1):43–57. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-43-57>
22. Shrivastava S., Schneider M.F. Evidence for two-dimensional solitary sound waves in a lipid controlled interface and its implications for biological signalling. *J. R. Soc. Interface.* 2014;11(97):20140098. <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.0098>
23. Heimburg T., Jackson A.D. On soliton propagation in biomembranes and nerves. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2005;102(28):9790–9795. <https://doi.org/10.1073/pnas.0503823102>
24. Lei L., Changqing S., Juelian S., Lam P.M., Yun H. Soliton propagation in liquid crystals. *Phys. Rev. Lett.* 1982;49(18):1335. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1335>
25. Shen Y., Dierking I. Dynamics of electrically driven solitons in nematic and cholesteric liquid crystals. *Commun. Phys.* 2020;3(1):14. <https://doi.org/10.1038/s42005-020-0288-4>
26. Cavallo F., De Giovanni C., Nanni P., Forni G., Lollini P.-L. 2011: the immune hallmarks of cancer. *Cancer Immunol. Immunother.* 2011;60(3):319–326. <https://doi.org/10.1007/s00262-010-0968-0>
27. Žmuidzinis J.S. Electron trapping and transport by supersonic solitons in one-dimensional systems. *Phys. Rev. B.* 1978;17(10):3919. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.17.3919>
28. Kadantsev V.N., Goltsov A.N., Kondakov M.A. Electrosoliton dynamics in a thermalized molecular chain. *Russian Technological Journal.* 2020;8(1): 43–57 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-43-57>

Об авторах

Каданцев Василий Николаевич, д.ф.-м.н., профессор кафедры биокibernетических систем и технологий Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: appl.synergy@yandex.ru. <http://orcid.org/0000-0001-9205-6527>

Гольцов Алексей Николаевич, д.ф.-м.н., профессор кафедры биокibernетических систем и технологий Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: alexey.goltsov@gmail.com. Scopus Author ID 56234051200, ResearcherID I-3755-2019, SPIN-код РИНЦ 8852-2616, <http://orcid.org/0000-0001-6725-189X>

About the authors

Vasily N. Kadantsev, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of Biocybernetic Systems and Technologies, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: appl.synergy@yandex.ru. <http://orcid.org/0000-0001-9205-6527>

Alexey N. Goltsov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of Biocybernetic Systems and Technologies, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: alexey.goltsov@gmail.com. Scopus Author ID 56234051200, ResearcherID I-3755-2019, RSCI SPIN-code 8852-2616, <http://orcid.org/0000-0001-6725-189X>

Микро- и наноэлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 537.613; 530.182; 622.4
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-55-64>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Эффекты невязимности при распространении спиновых волн в двухслойном магнетонном микроволноводе на основе пленок железо-иттриевого граната

С.А. Одинцов^{1, @},
Э.Г. Локк²,
Е.Н. Бегинин¹,
А.В. Садовников¹

¹ Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, 410012 Россия

² Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук, Московская область, Фрязино, 141120 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: odinoff@gmail.com

Резюме

Цели. Эффекты невязимности спиновых волн могут проявляться в металлизированных пленках феррит-гранатов. В настоящее время актуальной задачей является исследование динамики спиновых волн в микро- и наноразмерных магнитных пленках. Использование многослойных диэлектрических пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ) обеспечивает проявление эффекта невязимности и в то же время дает большее преимущество по сравнению со слоистой структурой ЖИГ/металл ввиду значительно меньших спин-волновых потерь в двухслойной пленке ЖИГ, состоящей из слоев с различными значениями намагниченности. Такие пленки могут найти применение в задачах магнетонной логики для создания управляемых интерферометров типа Маха – Цендера на основе принципов магнетоники. Цель настоящей работы – объединение концепции невязимного спин-волнового распространения сигнала и одновременного проявления эффектов, возникающих при распространении спиновых волн в микроволноводах, образованных пленками ЖИГ конечной ширины.

Методы. В работе используются экспериментальный метод микроволновой спектроскопии на основе векторного анализатора цепей и метод конечных разностей для численного моделирования дисперсионных характеристик спиновых волн в двухслойных магнетонных микроволноводах. Также использована аналитическая модель, в рамках которой получено дисперсионное уравнение на основе магнетостатического приближения.

Результаты. На основе измерений амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик показана возможность сосуществования двух частотных диапазонов для распространения спин-волнового сигнала в двухслойном магнетонном микроволноводе на основе пленки ЖИГ, образованной двумя слоями с различными значениями намагниченности насыщения. Выявлены режимы невязимного распространения спин-волнового сигнала. С помощью численной модели исследованы механизмы формирования в спектре двухслойной структуры ширинных мод спиновых волн, образующихся вследствие конечных размеров микроволновода. Оценка трансформации спектра мод также проведена при использовании аналитической модели. Экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами предложенных численной и аналитической моделей.

Выводы. Продemonстрирована возможность частотно-селективного распространения спиновых волн в магнонном микроволноводе, состоящем из двух слоев с различным значением величины намагниченности насыщения. Показано, что многомодовое распространение спиновых волн может осуществляться внутри двухслойной структуры в двух диапазонах частот. В то же время этот процесс сопровождается сильной невязимостью распространений спин-волнового сигнала, что проявляется в изменении амплитудно- и фазо-частотных характеристик при изменении направления внешнего магнитного поля на противоположное. Предложенная концепция двухслойного спин-волнового волновода может лежать в основе изготовления магнонных межсоединений и магнонных интерферометров с поддержкой многополосных режимов работы.

Ключевые слова: спиновые волны, невязимность, микроструктуры, волновод, магноника

• Поступила: 14.03.2022 • Доработана: 10.05.2022 • Принята к опубликованию: 27.06.2022

Для цитирования: Одинцов С.А., Локк Э.Г., Бегинин Е.Н., Садовников А.В. Эффекты невязимности при распространении спиновых волн в двухслойном магнонном микроволноводе на основе пленок железо-иттриевого граната. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):55–64. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-55-64>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Nonreciprocal propagation of spin waves in a bilayer magnonic waveguide based on yttrium-iron garnet films

Sergey A. Odintsov ^{1, @},
Edwin H. Lock ²,
Evgeniy N. Beginin ¹,
Alexander V. Sadovnikov ¹

¹ Saratov State University, Saratov, 410012 Russia

² Fryazino Branch, Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Moscow oblast, Fryazino, 141120 Russia

@ Corresponding author, e-mail: odinoff@gmail.com

Abstract

Objectives. Nonreciprocal spin wave effects can manifest themselves in metalized films of ferrite garnets. By studying the dynamics of spin waves in micro- and nano-scale magnetic films, the possibility of using multilayer dielectric films of yttrium iron garnet (YIG) to ensure the manifestation of the nonreciprocity effect is demonstrated. This approach offers advantages compared to the use of a layered YIG/metal structure due to significantly lower spin-wave losses in the two-layer YIG film consisting of layers with different values of magnetization. Such films can be used in logical elements to create controllable Mach–Zehnder interferometers based on magnonic principles. The purpose of this work is to reconcile the concept of nonreciprocal spin-wave propagation of a signal with the simultaneous manifestation of the effects arising from the propagation of spin waves in microwave guides formed by finite-width YIG films.

Methods. We used an experimental microwave spectroscopy method based on a vector network analyzer along with a finite difference method to perform a numerical simulation of the dispersion characteristics of spin waves in two-layer magnonic microwave guides. An analytical model was also used to obtain a dispersion equation based on the magnetostatic approximation.

Results. Based on measurements of the amplitude and phase responses, the possible coexistence of two frequency ranges for the propagation of a spin-wave signal in a two-layer magnon microwave guide based on a YIG film formed by two layers with different values of saturation magnetization was demonstrated. Regimes of nonreciprocal propagation of a spin-wave signal were revealed. A numerical model was used to study the formation mechanisms of spin wave modes in the spectrum of a two-layer structure formed due to the finite dimensions of the microwave guide. An analytical model was used to evaluate the transformation of the mode spectrum. The experimental data are in good agreement with the results of the proposed numerical and analytical models.

Conclusions. The possibility of frequency-selective propagation of spin waves in a magnon microwaveguide consisting of two layers with different saturation magnetization values is demonstrated. Multimode propagation of spin waves can occur inside a two-layer structure in two frequency ranges. At the same time, this process is accompanied by a strong nonreciprocity of spin-wave signal propagation, which manifests itself in a change in the amplitude and phase responses when the direction of the external magnetic field is reversed. The proposed two-layer spin-wave waveguide concept can be used in the manufacture of magnon interconnects and magnon interferometers with the support of multiband regimes of operation.

Keywords: spin waves, nonreciprocity, microstructures, waveguide, magnonics

• Submitted: 14.03.2022 • Revised: 10.05.2022 • Accepted: 27.06.2022

For citation: Odintsov S.A., Lock E.H., Beginin E.N., Sadovnikov A.V. Nonreciprocal propagation of spin waves in a bilayer magnonic waveguide based on yttrium-iron garnet films. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):55–64. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-55-64>

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

Магнитные тонкопленочные системы (МТС) используются для обработки сигналов [1], магнитной записи и хранения информации [2, 3] и нового применения метаматериалов [4]. Разнообразие МТС включает системы одиночных магнитных пленок, двойных магнитных пленок и многослойных магнитных пленок, состоящих из ферромагнитных (ФМ), антиферромагнитных и немагнитных (НМ) пленок различной толщины и расположения слоев, среди которых мультислои ФМ/НМ вызвали наибольший интерес в последнее десятилетие [5]. Изучение релаксационных процессов в магнитных спиновых системах является одной из интересных и актуальных задач. В частности, это связано с проводимыми в последнее время активными исследованиями и перспективами практического использования многослойных магнитопленочных структур.

При создании систем обработки информации на сверхвысоких частотах, в которых информация кодируется через амплитуду и фазу магнитоэлектрических спиновых волн (СВ) [6–8], распространяющихся в ферритовых пленках, важным является исследование дисперсии различных типов магнитоэлектрических СВ, что определяет характеристики таких устройств. В настоящее время активно развивается концепция магнетонной логики, используемая

в большом числе магнетонных элементов, таких как мажоритарные вентили, полусумматоры, логические элементы NOR, XOR [9]. Возможность создания таких элементов обусловлена линейными режимами интерференции СВ в магнетонных микроволноводах. В частности, образующим блоком магнетонных сетей является структура на основе интерферометра Маха – Цендера, демонстрирующего возможность как конструктивной, так и деструктивной интерференции различных мод СВ в выходной секции интерферометра [10]. Использование многослойных диэлектрических пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ) обеспечивает проявление эффекта не взаимности и в то же время дает большее преимущество с хорошо известными слоистыми структурами ЖИГ/металл, ввиду значительно меньших спиновых потерь в двуслойной пленке ЖИГ, состоящей из слоев с различными значениями намагниченности. Ферромагнитные тонкие пленки ЖИГ обладают значительно меньшим динамическим затуханием СВ по сравнению с металлическими магнитными пленками, что показано даже для случая ЖИГ нанометровой толщины [20]. Такие пленки могут найти применение в задачах магнетонной логики для создания управляемых интерферометров типа Маха – Цендера на основе принципов магнетоники.

Динамика СВ в наноразмерных ФМ пленках была предметом исследований в последние

десятилетия [11]. Одно из перспективных направлений изучения – приложение СВ для устройств обработки сигналов, поскольку длина волны СВ короче, чем у электромагнитных волн в гигагерцовом диапазоне частот [8], что делает задачу миниатюризации магнонных устройств актуальной [12]. Диэлектрическая магнетика рассматривается как альтернатива концепциям полупроводниковых устройств обработки сигналов [14, 17–19]. В магнонных средах информация переносится СВ (или магнонами) вместо электронов. Таким образом, использование структурированного ЖИГ обеспечивает основу для вычислительной техники следующего поколения с низким уровнем энергопотребления [14, 21, 22]. Магнонный микроволновод является универсальным элементом взаимосвязи между магнонными функциональными блоками внутри магнонной сети [23, 24]. Боковые ограничения магнонного волновода [25, 26] являются внутренней особенностью, определяющей характеристики распространения СВ вдоль соединения. Одновременное использование боковых ограничений и многослойности структуры для распространения СВ может быть использовано для частотно- и пространственно-селективных режимов работы волновода.

Невзаимность СВ известна со времен работы Дамона и Эшбаха [8], где было предсказано, что амплитуда прецессии намагниченности поверхностных мод должна быть несимметричной относительно направления распространения. Это поведение хорошо известно и было экспериментально измерено в микро- и наноразмерных магнитных пленках с использованием, например, метода спектроскопии Мандельштама – Бриллюэна [27, 28]. Невзаимное поведение СВ уже исследовалось для ФМ пленок с различной магнитной анизотропией на поверхности [28–32], для пленок с межзонными магнонными переходами [33], для обменно-связанных пленок [34]. Кроме того, теоретически и экспериментально показано, что межфазное взаимодействие Дзялошинского – Мориа [37–39], индуцированное в сверхтонких слоях ФМ, покрытых пленками тяжелых металлов, заметно влияет на спектры СВ, вызывая невзаимность в дисперсионных характеристиках. Однако использование диэлектрических пленок ЖИГ дает большее преимущество по сравнению с металлическими пленками из-за значительно меньших спин-волновых потерь в ЖИГ.

С другой стороны, в контексте обработки данных, невзаимность СВ, которая может проявляться в фазовой, амплитудной или частотной зависимости направления распространения СВ, является мощным инструментом для возможных приложений в коммуникационных и логических устройствах [39–41]. Явления невзаимного распространения волн были

в центре внимания исследований фотонных и электронных структур. Было обнаружено, что такие структуры обеспечивают режимы работы в изоляторах, циркуляторах и гираторах [42, 43]. Точно так же невзаимные эффекты, проявляющиеся при распространении СВ, определяют функциональные режимы работы магнонных устройств [39, 44, 45]. При этом важно отметить, что для создания интерферометров типа Маха – Цендера определяющим будет исследование режимов распространения СВ в магнонном микроволноводе конечной ширины, изготовленном из многослойной ферритовой пленки.

В работе исследуется спин-волновая динамика в двухслойном магнонном волноводе с использованием численной модели, микромагнитного моделирования и метода экспериментального исследования на основе микроволновой спектроскопии. При помощи анализа магнитных свойств каждого слоя и их равновесных конфигураций прогнозируются оптимальные условия для увеличения коэффициента частотной невзаимности встречных СВ в конфигурации Деймона – Эшбаха, которые затем подтверждаются моделированием и могут быть измерены методом микроволновой спектроскопии для прототипа двуслойного микроволновода на основе ЖИГ. Предложенная концепция двухслойного спин-волнового волновода лежит в основе изготовления магнонных межсоединений и магнонных интерферометров с поддержкой многополосных режимов работы.

1. СТРУКТУРА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

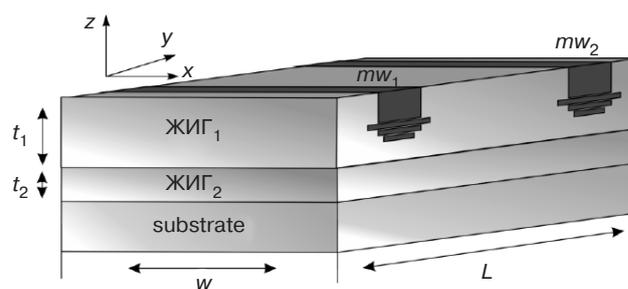


Рис. 1. Схематическое изображение двухслойного магнонного микроволновода с микроволновыми антеннами поверх одного из слоев

На рис. 1 показана схема исследуемой двухслойной спин-волноводной структуры. Для исследования были использованы монокристаллические ферромагнитные двухслойные ферритовые пленки ЖИГ $[Y_3Fe_5O_{12}]$ (НИИ Материаловедения, г. Зеленоград, Россия) размером $0.5 \times 7 \text{ мм}^2$, эпитаксиально выращенные на подложках галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) $[Gd_3Ga_5O_{12}(\text{GGG})]$ (НИИ Материаловедения), плоскость которых совпадала с кристаллографической плоскостью (111). При создании пленки

на подложке из ГГГ сначала был выращен слой чистого ЖИГ толщиной 7 мкм с намагниченностью насыщения $4\pi M_1 = 1738$ Гс (этот слой будем называть ЖИГ₁), а на нем был выращен слой ЖИГ, легированный галлием и лантаном, толщиной 9 мкм с намагниченностью насыщения $4\pi M_2 = 904$ Гс (этот слой будем называть ЖИГ₂). Структура помещена в однородное внешнее магнитное поле $H_0 = 670$ Э, ориентированное вдоль положительного либо отрицательного направления оси x . Ширина обоих образцов $w = 500$ мкм, длина составила $L = 7$ мм. Входной и выходной микроволновые преобразователи (Микран, Россия) шириной 30 мкм были прикреплены к конструкции и обозначены на рис. 1 как « mw_1 » и « mw_2 ».

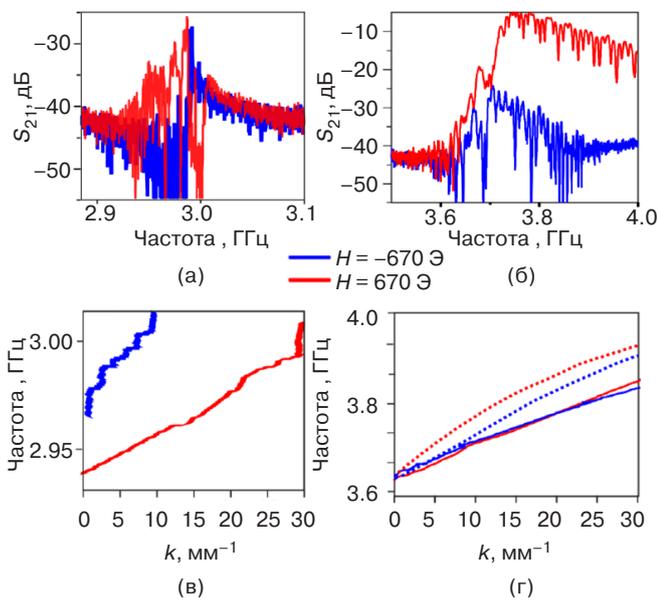


Рис. 2. Модуль коэффициента передачи и дисперсионные характеристики СВ на выходе структуры

С помощью векторного анализатора цепей E8362C PNA Vector Network Analyzer (Keysight Technologies, США) было проведено экспериментальное исследование характеристик СВ. На рис. 2а и рис. 2б показана частотная зависимость модуля коэффициента передачи $|S_{21}|$ в положительном направлении внешнего магнитного поля (красная кривая) и отрицательном направлении (синяя кривая), который был измерен в случае, когда выходной преобразователь расположен в конце структуры. Можно наблюдать две хорошо выраженные полосы частот: полоса низких частот (НЧ) (2.92–3.01 ГГц) на рис. 2а и полоса высоких частот (ВЧ) (3.61–4.0 ГГц) на рис. 2б. При изменении направления внешнего магнитного поля видно, как меняется ширина полос пропускания в НЧ и в ВЧ областях. Амплитуда СВ уменьшается в случае отрицательного направления внешнего магнитного поля из-за того, что микрополосковый

преобразователь располагался с одной стороны образца, а именно со стороны ЖИГ₁.

На рис. 2в и рис. 2г показаны измеренные дисперсионные характеристики СВ, распространяющихся вдоль двухслойной структуры при положительном (сплошная красная кривая) и отрицательном (сплошная синяя кривая) направлениях внешнего магнитного поля в разных частотных диапазонах: низкочастотном и высокочастотном, соответственно. Пунктирными линиями показаны результаты микромагнитного моделирования дисперсионной характеристики в ВЧ диапазоне. Изменение направления внешнего магнитного поля меняет характеристики распространения СВ в двухслойной структуре по причине разной величины насыщения намагниченности в слоях исследуемой структуры. Все измерения проводились при значении магнитного поля 670 Э.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Была разработана аналитическая модель дисперсионного уравнения на основе магнитостатического приближения для ЖИГ волновода конечной ширины и дисперсии двухслойной пленки FM1/FM2, описанной в [25]. Использовано уравнение (3) из [19] с заменой $k_x^2 + k_y^2 - k$ и $k_z = \frac{n\pi}{\omega}$, $n = 1, 2, 3, \dots$, где n – индекс моды поперечной СВ. На рис. 3а представлены результаты решения дисперсионных уравнений СВ в двухслойной структуре для $w = 500$ мкм. С помощью численного моделирования метода конечных элементов было получено прямое решение системы уравнений Максвелла для трех первых мод СВ для двухслойной системы. Данный результат соответствует дисперсионной характеристике для рис. 3а, где каждая мода обозначена цветом: красная кривая соответствует $n = 1$; синяя соответствует $n = 2$; зеленая соответствует $n = 3$. Было обнаружено хорошее согласие между решением задачи на собственные моды и аналитическим подходом. Для нижней ветви дисперсионной характеристики моды выглядят так же, однако СВ распространяются в слое ЖИГ с меньшим насыщением намагниченности.

Для оценки явления невзаимности используем коэффициент невзаимности как $\kappa_{HF} = f_+ - f_-$, где f_+ – частота распространения СВ в положительном направлении оси y , а f_- – частота распространения СВ в отрицательном направлении оси y с тем же волновым числом k . Также определяется коэффициент невзаимности для нижней ветви дисперсионной характеристики $\kappa_{HF} = f_+ - f_-$. Оба коэффициента показаны на рис. 3б и рис. 3в для $w = 500$ мкм. Таким образом, с ростом волнового числа коэффициент невзаимности уменьшается для верхней ветви дисперсионной характеристики и увеличивается

для нижней. Это открывает возможности для создания волноведущих структур с функцией демультимплексирования сигналов, фильтрации и параллельной обработки данных в двух отдельных диапазонах частот.

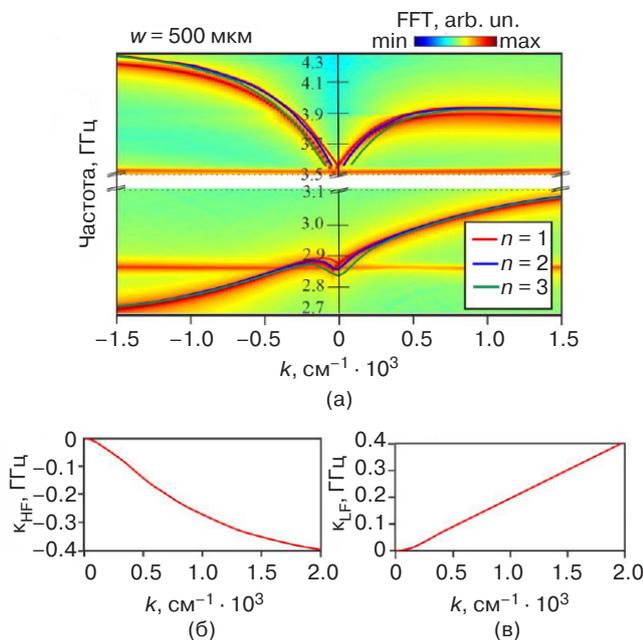


Рис. 3. (а) Дисперсионные характеристики, измеренные с помощью аналитической модели и в результате микромагнитного моделирования; (б) коэффициент невязности κ_{HF} для области ВЧ; (в) коэффициент невязности κ_{LF} для наименьших дисперсионных характеристик

Проведена оценка распределения внутреннего магнитного поля с помощью микромагнитного моделирования, которое было выполнено с использованием программного кода *MuMax3* [47]. Для этого рассмотрена модель, соответствующая экспериментальному образцу исследуемой структуры. Размер ячейки в системе составлял $4.00 \times 4.00 \times 1.25 \text{ мкм}^3$,

постоянная затухания $\alpha = 10^{-4}$. Материал, а также геометрия были выбраны в соответствии с параметрами, использованными в эксперименте. Разрешение расчетной области по оси Nz нумеровалось 12 слоями, что показано на схеме на рис. 4а. Система координат основана на глобальной системе координат, приведенной на рис. 1. Рис. 4б показывает результаты численного моделирования профилей внутренних магнитных полей в соответствующих слоях Nz и $w = 500 \text{ мкм}$. Видно, что при изменении ширины структуры внутренние магнитные поля критически уменьшаются на $Nz = 1-4$. Даже в верхних слоях внутренние магнитные поля испытывают влияние размагничивающих полей и границ структуры, что в свою очередь сильно влияет на спектры распространения СВ в этом типе конструкций.

Неоднородное распределение внутреннего магнитного поля приводит к более выраженному невязному поведению спин-волнового сигнала. В двухслойной системе, предложенной в [48], частотная невязность может включаться и выключаться простым переключением с антипараллельной на параллельную намагниченность без какого-либо вращения приложенного магнитного поля. Такое переключение можно даже контролировать и удобно осуществлять, применяя, например, спин-переносные или спин-орбитальные крутящие моменты через локальный ток. Кроме того, оба состояния – параллельное и антипараллельное – хорошо известны из применений гигантского магнитосопротивления и туннельного магнитосопротивления и могут быть настроены для обеспечения стабильности при остаточной намагниченности. Для настоящего двухслойного волновода такое переключение возможно при замене материала ЖИГ, например, на CoFeB [48, 49] и NiFe [50]. Тогда можно было бы реализовать дополнительную степень свободы для двухдиапазонной связи. С другой стороны, эта замена может привести к более высоким потерям распространения СВ

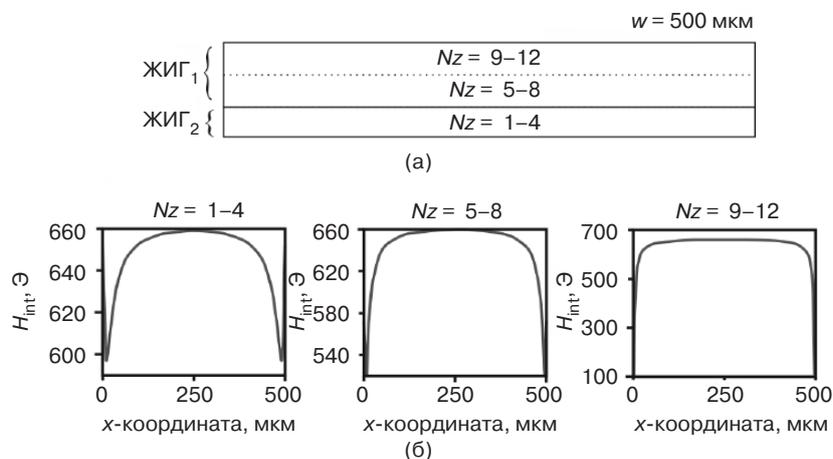


Рис. 4. (а) Схематичное изображение моделирования по оси z в *MuMax3*; (б) профили внутренних магнитных полей слоев для $w = 500 \text{ мкм}$

в металлических пленках. Таким образом, двухслойные волноводы ЖИГ демонстрируют способность имитировать широко изучаемые динамические свойства слоев ФМ-тяжелый металл и в то же время представляют собой простой способ управления величиной невязимности посредством геометрии и равновесной конфигурации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведено исследование режимов распространения спин-волнового сигнала в связанной двухслойной ферромагнитной системе. Микроволновая спектроскопия использовалась для исследования характеристик передачи СВ в двухслойном ЖИГ волноводе. С помощью магнито-статического подхода и численного моделирования задачи на собственные значения было продемонстрировано, что дипольное взаимодействие между ФМ слоями, создаваемое динамическими намагниченностями, является заметным источником невязимности в частотах СВ. Рассчитаны профили распределения величины внутреннего поля и коэффициент невязимности для двуслойной структуры. Выявлена трансформация дисперсионных кривых, распространяющихся в двух противоположных направлениях. Показано, что двуслойные структуры поддерживают две полосы частот распространения СВ, при этом в магнотном микроволноводе исследованы механизмы формирования в спектре двуслойной структуры ширинных мод СВ, образующихся вследствие конечных размеров микроволновода. При этом в спектре волн наблюдаются моды, соответствующие волнам с различным знаком групповой скорости.

Полученные результаты подтверждаются микромагнитным моделированием, которое демонстрирует возможность распространения СВ в низкочастотном и высокочастотном диапазонах двух слоев и локализацию мод СВ, наблюдаемых экспериментально. Эти результаты открывают новые пути изготовления невязимных магнотных устройств и побуждают к более глубокому изучению этого типа систем с целью оптимизации их конструкции в соответствии с желаемыми требованиями применения. При этом предложенная концепция двухслойного спин-волнового волновода может лежать в основе изготовления магнотных межсоединений и магнотных интерферометров с поддержкой многополосных режимов работы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РТУ МИРЭА «Инновации в реализации приоритетных направлений развития науки и технологий», проект НИЧ 28/28.

Вклад авторов

С.А. Одинцов – проведение, обработка и анализ численных и экспериментальных исследований, написание статьи.

Э.Г. Локк – создание экспериментального макета.

Е.Н. Бегинин – разработка методики численного исследования.

А.В. Садовников – идея исследования, проведение экспериментального исследования, редакция статьи.

Authors' contributions

S.A. Odintsov – conducting, processing, and analyzing the numerical and experimental studies, writing the text of the article.

E.H. Lock – creating the experimental model.

E.N. Beginin – development of numerical research methodology.

A.V. Sadovnikov – development of the research concept, conducting the experimental studies, and editing the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Amel'chenko M.D., Grishin S.V., Sharaevskii Y.P. Fast and slow electromagnetic waves in a longitudinally magnetized thin-film ferromagnetic metamaterial. *Tech. Phys. Lett.* 2019;45(12):1182–1186. <https://doi.org/10.1134/S1063785019120022>
2. Bajpai S.N. Excitation of magnetostatic surface waves: Effect of finite sample width. *J. Appl. Phys.* 1985;58(2): 910–913. <https://doi.org/10.1063/1.336164>
3. Beginin E., Kalyabin D., Popov P., Sadovnikov A., Sharaevskaya A., Stognij A., Nikitov S. 3D Magnonic Crystals. In: Gubbiotti G. (Ed.). *Three-Dimensional Magnonics*. Singapore: Jenny Stanford Publishing; 2019. P. 67–104. <https://doi.org/10.1201/9780429299155-3>
4. Belmeguenai M., Bouloussa H., Roussigne Y., Gabor M.S., Petrisor T., Tiusan C., Yang H., Stashkevich A., Chérif S.M. Interface Dzyaloshinskii-Moriya interaction in the interlayer antiferromagnetic-exchange coupled Pt/CoFeB/Ru/CoFeB systems. *Phys. Rev. B.* 2017;96(14):144402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.144402>
5. Berger A., Supper N., Ikeda Y., Lengsfeld B., Moser A., Fullerton E.E. Improved media performance in optimally coupled exchange spring layer media. *Appl. Phys. Lett.* 2008;93(12):122502. <https://doi.org/10.1063/1.2985903>
6. Bernier N.R., Tóth L.D., Koottandavida A., Ioannou M.A., Malz D., Nunnenkamp A., Feofanov A.K., Kippenberg T.J. Nonreciprocal reconfigurable microwave optomechanical circuit. *Nat. Commun.* 2017;8(1):604. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00447-1>
7. Camley R.E. Nonreciprocal surface waves. *Surface Sci. Rep.* 1987;7(3–4):103–187. [https://doi.org/10.1016/0167-5729\(87\)90006-9](https://doi.org/10.1016/0167-5729(87)90006-9)
8. Camley R., Celinski Z., Fal T., Glushchenko A., Hutchison A., Khivintsev Y., Kuanr B., Harward I., Veerakumar V., Zagorodnii V. High-frequency signal processing using magnetic layered structures. *J. Magn. Magn. Mater.* 2009;321(14):2048–2054. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.04.125>

9. Chumak A., et al. Roadmap on spin-wave computing. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2022;58(6). <https://doi.org/10.1109/TMAG.2022.3149664>
10. Balynsky M., Gutierrez D., Chiang H., et al. A magnetometer based on a spin wave interferometer. *Sci. Rep.* 2017;7(1):11539. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11881-y>
11. Chumak A.V., Pirro P., Serga A.A., Kostylev M.P., Stamps R.L., Schultheiss H., Hillebrands B. Spin-wave propagation in a microstructured magnonic crystal. *Appl. Phys. Lett.* 2009;95(26):262508. <https://doi.org/10.1063/1.3279138>
12. Damon R., Eshbach J. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab. *J. Phys. Chem. Solids*. 1961;19(3–4):308–320. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(61\)90041-5](https://doi.org/10.1016/0022-3697(61)90041-5)
13. Demidov V.E., Kostylev M.P., Rott K., Krzytsteczko P., Reiss G., Demokritov S.O. Excitation of microwaveguide modes by a stripe antenna. *Appl. Phys. Lett.* 2009;95(11):112509. <https://doi.org/10.1063/1.3231875>
14. Demokritov S.O. Magnons. In: Zang J., Cros V., Hoffmann A. (Eds.). *Topology in Magnetism*. Springer Series in Solid-State Sciences. 2018. V. 192. P. 299–334. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97334-0_10
15. Di K., Lim H.S., Zhang V.L., Ng S.C., Kuok M.H. Spin-wave nonreciprocity based on interband magnonic transitions. *Appl. Phys. Lett.* 2013;103(13):132401. <https://doi.org/10.1063/1.4822095>
16. Dzyaloshinsky I. A thermodynamic theory of “weak” ferromagnetism of antiferromagnetics. *J. Phys. Chem. Solids*. 1958;4(4):241–255. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(58\)90076-3](https://doi.org/10.1016/0022-3697(58)90076-3)
17. Evelt M., Demidov V.E., Bessonov V., Demokritov S.O., Prieto J.L., Munoz M., Ben Youssef J., Naletov V.V., de Loubens G., Klein O., Collet M., Garcia-Hernandez K., Bortolotti P., Cros V., Anane A. High-efficiency control of spin-wave propagation in ultra-thin yttrium iron garnet by the spin-orbit torque. *Appl. Phys. Lett.* 2016;108(17):172406. <https://doi.org/10.1063/1.4948252>
18. Fert A., Levy P.M. Role of anisotropic exchange interactions in determining the properties of spin-glasses. *Phys. Rev. Lett.* 1980;44(23):1538–1541. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.44.1538>
19. Gallardo R., Schneider T., Chaurasiya A., Oelschlagel A., Arekapudi S., Roldán-Molina A., Hübner R., Lenz K., Barman A., Fassbender J., Lindner J., Hellwig O., Landeros P. Reconfigurable spin-wave nonreciprocity induced by dipolar interaction in a coupled ferromagnetic bilayer. *Phys. Rev. Applied*. 2019;12(3):034012. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.12.034012>
20. Gladii O., Haidar M., Henry Y., Kostylev M., Bailleul M. Frequency nonreciprocity of surface spin wave in permalloy thin films. *Phys. Rev. B*. 2016;93(5):054430. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.054430>
21. Gurevich A.G., Melkov G.A. *Magnetization Oscillations and Waves*. CRC Press; 1996. 464 p.
22. Hartman G.C., Fitch R., Zhuang Y. Nonreciprocal magnetostatic wave propagation in micro-patterned NiFe thin films. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2014;24(7):484–486. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2014.2316260>
23. Hillebrands B. Spin-wave calculations for multilayered structures. *Phys. Rev. B*. 1990;41(1):530–540. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.41.530>
24. Jamali M., Smith A.K., Wang J.-P. Nonreciprocal behavior of the spin pumping in ultra-thin film of CoFeB. *J. Appl. Phys.* 2016;119(13):133903. <https://doi.org/10.1063/1.4945028>
25. Khalili Amiri P., Rejaei B., Vroubel M., Zhuang Y. Nonreciprocal spin wave spectroscopy of thin Ni–Fe stripes. *Appl. Phys. Lett.* 2007;91(6):062502. <https://doi.org/10.1063/1.2766842>
26. Khitun A., Bao M., Wang K.L. Magnonic logic circuits. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2010;43(26):264005. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/26/264005>
27. Kruglyak V.V., Demokritov S.O., Grundler D. Magnonics. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2010;43(26):264001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/26/264001>
28. Lan J., Yu W., Wu R., Xiao J. Spin-wave diode. *Phys. Rev. X*. 2015;5(4):041049. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.5.041049>
29. Lenk B., Ulrichs H., Garbs F., Munzenberg M. The building blocks of magnonics. *Phys. Rep.* 2011;507(4–5):107–136. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2011.06.003>
30. Moriya T. New mechanism of anisotropic superexchange interaction. *Phys. Rev. Lett.* 1960;4(5):228–230. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.4.228>
31. Mruczkiewicz M., Graczyk P., Lupo P., Adeyeye A., Gubbiotti G., Krawczyk M. Spin-wave nonreciprocity and magnonic band structure in a thin permalloy film induced by dynamical coupling with an array of Ni stripes. *Phys. Rev. B*. 2017;96(10):104411. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.104411>
32. Mruczkiewicz M., Krawczyk M., Gubbiotti G., Tacchi S., Filimonov Y.A., Kalyabin D.V., Lisenkov I.V., Nikitov S.A. Nonreciprocity of spin waves in metallized magnonic crystal. *New J. Phys.* 2013;15(11):113023. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/15/11/113023>
33. Mruczkiewicz M., Pavlov E.S., Vysotsky S.L., Krawczyk M., Filimonov Y.A., Nikitov S.A. Observation of magnonic band gaps in magnonic crystals with nonreciprocal dispersion relation. *Phys. Rev. B*. 2014;90(17):174416. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.90.174416>
34. Высоцкий С.Л., Казаков Г.Т., Маряхин А.В., Филимонов Ю.А. Объемные магнитостатические волны в обменно-связанных ферритовых пленках. *ЖТФ*. 1998;68(7):97–110. [Vysotskii S.L., Kazakov G.T., Filimonov Y.A., Maryakhin A.V. Magnetostatic volume waves in exchange-coupled ferrite films. *Tech. Phys.* 1998;43(7):834–845. <https://doi.org/10.1134/1.1259081>]
35. Neusser S., Grundler D. Magnonics: Spin waves on the nanoscale. *Adv. Mater.* 2009;21(28):2927–2932. <https://doi.org/10.1002/adma.200900809>
36. O’Keeffe T.W., Patterson R.W. Magnetostatic surface-wave propagation in finite samples. *J. Appl. Phys.* 1978;49(9):4886–4895. <https://doi.org/10.1063/1.325522>
37. Reiskarimian N., Krishnaswamy H. Magnetic-free non-reciprocity based on staggered commutation. *Nat. Commun.* 2016;7:11217. <https://doi.org/10.1038/ncomms11217>

38. Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Sheshukova S.E., Sharaevskii Y.P., Stognij A.I., Novitski N.N., Sakharov V.K., Khivintsev Y.V., Nikitov S.A. Route toward semiconductor magnonics: Light-induced spin-wave nonreciprocity in a YIG/GaAs structure. *Phys. Rev. B*. 2019;99(5):054424. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.054424>
39. Sadovnikov A.V., Grachev A.A., Odintsov S.A., Martyshkin A.A., Gubanov V.A., Sheshukova S.E., Nikitov S.A. Neuromorphic calculations using lateral arrays of magnetic microstructures with broken translational symmetry. *JETP Letters*. 2018;108(5):312–317. <https://doi.org/10.1134/S0021364018170113>
40. Sadovnikov A.V., Grachev A.A., Sheshukova S.E., Sharaevskii Y.P., Serdobintsev A.A., Mitin D.M., Nikitov S.A. Magnon straintronics: Reconfigurable spin-wave routing in strain-controlled bilateral magnetic stripes. *Phys. Rev. Lett.* 2018;120(25):257203. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.120.257203>
41. Sadovnikov A.V., Odintsov S.A., Beginin E.N., Sheshukova S.E., Sharaevskii Y.P., Nikitov S.A. Toward nonlinear magnonics: Intensity-dependent spin-wave switching in insulating sidecoupled magnetic stripes. *Phys. Rev. B*. 2017;96(14):144428. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.144428>
42. Sander D., Valenzuela S.O., Makarov D., Marrows C.H., Fullerton E.E., Fischer P., McCord J., Vavassori P., Mangin S., Pirro P., Hillebrands B., Kent A.D., Jungwirth T., Gutfleisch O., Kim C.G., Berger A. The 2017 magnetism roadmap. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2017;50(36):363001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa81a1>
43. Shen Z., Zhang Y.-L., Chen Y., Sun F.-W., Zou X.-B., Guo G.-C., Zou C.-L., Dong C.-H. Reconfigurable optomechanical circulator and directional amplifier. *Nat. Commun.* 2018;9(1):1797. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04187-8>
44. Sounas D., Alù A. Non-reciprocal photonics based on time modulation. *Nature Photon.* 2017;11:774–783. <https://doi.org/10.1038/s41566-017-0051-x>
45. Suess D. Multilayer exchange spring media for magnetic recording. *Appl. Phys. Lett.* 2006;89(11):113105. <https://doi.org/10.1063/1.2347894>
46. Tacchi S., Gruszecki P., Madami M., Carlotti G., Klos J., Krawczyk M., Adeyeye A. Universal dependence of the spin wave band structure on the geometrical characteristics of two-dimensional magnonic crystals. *Sci. Rep.* 2015;5:10367. <https://doi.org/10.1038/srep10367>
47. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., Waeyenberge B.V. The design and verification of MuMax3. *AIP Advances*. 2014;4(10):107133. <https://doi.org/10.1063/1.4899186>
48. Vetrova I.V., Zelent M., Šoltýs J., Gubanov V.A., Sadovnikov A.V., Šcepka T., Dérer J., Stoklas R., Cambel V., Mruczkiewicz M. Investigation of self-nucleated skyrmion states in the ferromagnetic/nonmagnetic multilayer dot. *Appl. Phys. Lett.* 2021;118(21):212409. <https://doi.org/10.1063/5.0045835>
49. Vogel M., Chumak A.V., Waller E.H., Langner T., Vasyuchka V.I., Hillebrands B., Freymann, G. Optically reconfigurable magnetic materials. *Nature Phys.* 2015;11(6):487–491. <https://doi.org/10.1038/nphys3325>
50. Wang X.S., Zhang H.W., Wang X.R. Topological magnonics: A paradigm for spin-wave manipulation and device design. *Phys. Rev. Applied*. 2018;9(2):024029. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.9.024029>

Об авторах

Одинцов Сергей Александрович, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории «Магнитные метаматериалы» Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (410012, Россия, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83), победитель II Всероссийского научного конкурса «Инновации в реализации приоритетных направлений развития науки и технологий». E-mail: odinoff@gmail.com. Scopus Author ID 57192873555, ResearcherID P-2795-2017, SPIN-код РИНЦ 3874-1140, <https://orcid.org/0000-0001-9664-6997>

Локк Эдвин Гарриевич, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией исследования СВЧ свойств ферромагнетиков Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (141120, Россия, Московская область, г. Фрязино, пл. Введенского, д. 1). E-mail: edwin@ms.ire.rssi.ru. Scopus Author ID 6603875313, ResearcherID C-5325-2012, SPIN-код РИНЦ 1030-4543, <https://orcid.org/0000-0003-0635-7687>

Бегинин Евгений Николаевич, к.ф.-м.н., заведующий кафедрой нелинейной физики Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (410012, Россия, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83). E-mail: egbegin@gmail.com. Scopus Author ID 24722705200, ResearcherID D-5766-2013, SPIN-код РИНЦ 2335-8660, <https://orcid.org/0000-0001-7138-8282>

Садовников Александр Владимирович, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики открытых систем Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (410012, Россия, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83). E-mail: sadovnikovav@gmail.com. Scopus Author ID 36683238600, ResearcherID F-6183-2012. SPIN-код РИНЦ 8124-6029. <https://orcid.org/0000-0002-8847-2621>

About the authors

Sergey A. Odintsov, Postgraduate Student, Junior Researcher, Laboratory Management Magnetic Metamaterials, Saratov State University (83, Astrakhanskaya ul., Saratov, 410012 Russia). E-mail: odinoff@gmail.com. Scopus Author ID 57192873555, ResearcherID P-2795-2017, RSCI SPIN-code 3874-1140, <https://orcid.org/0000-0001-9664-6997>

Edwin H. Lock, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Laboratory of Microwave Properties of Ferromagnetics, Fryazino Branch, Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Science (1, Vvedenskogo pl., Moscow oblast, Fryazino, 141120 Russia). E-mail: edwin@ms.ire.rssi.ru. Scopus Author ID 6603875313, ResearcherID C-5325-2012, RSCI SPIN-code 1030-4543, <https://orcid.org/0000-0003-0635-7687>

Evgeniy N. Beginin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Department of Nonlinear Physics, Saratov State University (83, Astrakhanskaya ul., Saratov, 410012 Russia). E-mail: ebegin@gmail.com. Scopus Author ID 24722705200, ResearcherID D-5766-2013, RSCI SPIN-code 2335-8660, <https://orcid.org/0000-0001-7138-8282>

Alexander V. Sadovnikov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Open Systems Physics, Saratov State University (83, Astrakhanskaya ul., Saratov, 410012 Russia). E-mail: sadovnikovav@gmail.com. Scopus Author ID 36683238600, ResearcherID F-6183-2012, RSCI SPIN-code 8124-6029, <https://orcid.org/0000-0002-8847-2621>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 519.857
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-65-74>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Сплайн-аппроксимация многозначных функций в проектировании трасс линейных сооружений

Д.А. Карпов,
В.И. Струченков [®]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[®] Автор для переписки, e-mail: str1942@mail.ru

Резюме

Цели. В настоящее время наблюдается бурное развитие теории и методов сплайн-аппроксимации плоских кривых, заданных последовательностью точек. Проведенные исследования, первые результаты которых были опубликованы ранее, показали возможность применения сплайн-аппроксимации в проектировании трасс линейных сооружений, несмотря на принципиальные отличия используемых сплайнов от рассматриваемых в теории и ее приложениях. Главное отличие состоит в том, что в проектировании трасс нельзя заранее считать известным число элементов сплайна. Кроме того, в отличие от получивших широкое распространение полиномиальных сплайнов, повторяющимся элементом является связка «отрезок прямой + дуга окружности» или «отрезок прямой + дуга клотоиды + дуга окружности + дуга клотоиды». Ранее была предложена двухэтапная схема: определение числа элементов искомого сплайна, затем – оптимизация его параметров. Алгоритм решения задачи применительно к проектированию продольного профиля реализован и опубликован. Но этот алгоритм непригоден для проектирования плана трассы, т.к. план трассы, в отличие от профиля, в общем случае является многозначной функцией. Цель работы – обобщить алгоритм на случай сплайн-аппроксимации многозначных функций с учетом особенностей проектирования трасс линейных сооружений.

Методы. На первом этапе используется новая математическая модель, позволяющая применить метод динамического программирования с учетом ограничений на параметры искомого сплайна. На втором этапе используется нелинейное программирование. При этом удастся вычислять аналитически производные целевой функции по параметрам сплайна при отсутствии ее аналитического выражения через эти параметры.

Результаты. Разработаны алгоритм аппроксимации многозначных функций, заданных дискретным рядом точек, сплайном, состоящим из дуг окружностей, сопрягаемых отрезками прямых, для решения задачи на первом этапе и алгоритм нелинейного программирования для оптимизации параметров полученного сплайна как начального приближения. В настоящей статье рассматривается только первый этап, т.к. сложный алгоритм второго этапа и его обоснование требуют отдельного рассмотрения.

Выводы. Двухэтапная схема сплайн-аппроксимации при неизвестном числе элементов сплайна пригодна и для аппроксимации многозначных функций, заданных последовательностью точек на плоскости, в частности для проектирования плана трасс линейных сооружений.

Ключевые слова: трасса, план, продольный профиль, сплайн, динамическое программирование, целевая функция, ограничения

• Поступила: 27.01.2022 • Доработана: 26.05.2022 • Принята к опубликованию: 24.06.2022

Для цитирования: Карпов Д.А., Струченков В.И. Сплайн-аппроксимация многозначных функций в проектировании трасс линейных сооружений. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):65–74. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-65-74>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Spline approximation of multivalued functions in linear structures routing

Dmitry A. Karpov,
Valery I. Struchenkov [®]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: str1942@mail.ru

Abstract

Objectives. The theory and methods of spline approximation of plane curves given by a sequence of points are currently undergoing rapid development. Despite fundamental differences between used splines and those considered in the theory and its applications, results published earlier demonstrate the possibility of using spline approximation when designing routes of linear structures. The main difference here consists in the impossibility of assuming in advance the number of spline elements when designing the routes. Here, in contrast to widely used polynomial splines, the repeating element is the link “segment of a straight line + arc of a circle” or “segment of a straight line + arc of a clothoid + arc of a circle + arc of a clothoid.” Previously, a two-stage scheme consisting of a determination of the number of elements of the desired spline and subsequent optimization of its parameters was proposed. Although an algorithm for solving the problem in relation to the design of a longitudinal profile has been implemented and published, this is not suitable for designing a route plan, since, unlike a profile, a route plan is generally a multivalued function. The present paper aims to generalize the algorithm for the case of spline approximation of multivalued functions making allowance for the design features of the routes of linear structures.

Methods. At the first stage, a novel mathematical model is developed to apply the dynamic programming method taking into account the constraints on the desired spline parameters. At the second stage, nonlinear programming is used. In this case, it is possible to analytically calculate the derivatives of the objective function with respect to the spline parameters in the absence of its analytical expression through these parameters.

Results. An algorithm developed for approximating multivalued functions given by a discrete series of points using a spline consisting of arcs of circles conjugated by line segments for solving the first stage of the problem is presented. An additional nonlinear programming algorithm was also used to optimize the parameters of the resulting spline as an initial approximation. However, in the present paper, the first stage is considered only, since the complex algorithm of the second stage and its justification require separate consideration.

Conclusions. The presented two-stage spline approximation scheme with an unknown number of spline elements is also suitable for approximating multivalued functions given by a sequence of points on a plane, in particular, for designing a route plan for linear structures.

Keywords: route, plan, longitudinal profile, spline, dynamic programming, objective function, constraints

• Submitted: 27.01.2022 • Revised: 26.05.2022 • Accepted: 24.06.2022

For citation: Karpov D.A., Struchenkov V.I. Spline approximation of multivalued functions in linear structures routing. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):65–74. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-65-74>

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

Настоящая статья является продолжением [1], где рассматривалась задача аппроксимации функций, заданных последовательностью точек на плоскости, сплайном специального вида. Элементами сплайна являлись дуги окружностей, сопрягаемых отрезками прямых. Задача рассматривалась применительно к проектированию продольного профиля трасс линейных сооружений (железные и автомобильные дороги, трубопроводы различного назначения и др.) Поскольку трасса – это пространственная кривая, ее план – это ее проекция на плоскость XOY , а продольный профиль – функция $Z(s)$, где s – длина дуги в плане от заданного начала, то продольный профиль – это плоская кривая, являющаяся графиком однозначной функции. Данное обстоятельство использовалось при разработке алгоритма сплайн-аппроксимации, о котором шла речь в [1]. План трассы может как быть, так и не быть графиком однозначной функции. В общем случае алгоритмы, реализованные ранее, для многозначных функций оказываются непригодны. Нужны другие математические модели и методы.

Первоначально в теории сплайнов, возникшей в конце 1960-х гг. [2], рассматривалась задача интерполяции заданных точек (узлов) некоторой кривой, состоящей из элементов одного и того же заданного вида, которые в узлах сплайна имели бы общую ординату и, как правило, общую касательную.

В дальнейшем фиксировались только абсциссы узлов и вместо интерполяции перешли к решению задач сплайн-аппроксимации. Потом стали решать задачи сплайн-аппроксимации при варьировании не только ординатами, но и абсциссами узлов. При этом число элементов сплайна считалось известным. Наибольшее применение получили полиномиальные, в частности, кубические сплайны [3].

Задачи сплайн-аппроксимации, которые возникают при проектировании трасс железных и автомобильных дорог и других линейных сооружений, отличаются тем, что повторяющимися элементами сплайна являются связки элементов: при проектировании плана трассы это «прямая + клотоида +

+ окружность + клотоида и т.д.». Поиск числа элементов сплайна представляет собой отдельную, достаточно сложную задачу, как и оптимизация параметров сплайна, определяющих его положение на плоскости.

Как отмечает в статье [4] профессор Хао Пу, в Китае функционирует более 120 000 км железных дорог, и около 20 000 км существующих железных дорог должны быть реконструированы до 2025 г. Он утверждает, что проектировщики в Китае очень заинтересованы в появлении автоматического и точного метода проектирования плана трассы.

В СССР в 1970-х гг. при проектировании Байкало-Амурской магистрали (БАМ) использовались только что созданные первые программы проектирования продольного профиля на всех трех ЭВМ БЭСМ-4, имевшихся в распоряжении проектных институтов Минтрансстроя в Москве, Ленинграде и Новосибирске [5]. Из-за крайне ограниченных технических возможностей этой лучшей из доступных в то время ЭВМ (оперативная память 4 096 ячеек, быстродействие 40 000 операций в секунду), отсутствия средств визуализации, сложностей ввода исходных данных (перфокарты) не было достигнуто существенного снижения затрат в проектировании. Но на различных участках БАМ были получены результаты, доказавшие эффективность применения математически корректных методов оптимизации прежде всего за счет повышения качества проектных решений [5]. В 1980-х гг. на ЭВМ ЕС была создана отечественная система автоматизированного проектирования (САПР) новых железных дорог, в которой использовались проектирующие программы, но не было визуализации исходных данных и результатов. Поэтому при переходе на персональные компьютеры широкое распространение получили импортные системы, в которых такие средства и программы были и есть, но методы оптимизации не используются. С тех пор утвердился миф о том, что оптимизация и не нужна, т.к. проектировщик в интерактивном режиме получает оптимальные решения. Однако постепенно, в т.ч. и под влиянием работ таких авторов, как Хао Пу и других, приходит понимание, что это далеко не так.

В настоящее время в действующих САПР^{1, 2, 3, 4, 5}, как и в прошлом веке, задача оптимизации параметров сплайна решается в интерактивном режиме: проектировщик задает информацию, однозначно определяющую искомый проектный сплайн. По существу, это метод подбора элементов в графическом режиме с визуальным контролем. Компьютер используется вместо лекала и линейки, математические методы оптимизации не применяются. Качество полученных результатов зависит от опыта, интуиции и мотивации проектировщика. Это «ползание по экрану» представляет собой достаточно трудоемкий процесс, что оправдывает исследования по формализации задачи в математических моделях и применение математически корректных алгоритмов оптимизации. Вместо этого в России и за рубежом предлагались разного рода эвристические алгоритмы. Заданные точки соединялись отрезками прямых, получалась ломаная линия (сплайн первого порядка), которую требовалось заменить сплайном с окружностями, сопрягаемыми прямыми или клотоидами и прямыми, при наименьшем (в определенном смысле) отклонении от исходного сплайна (ломаной). При этом на параметры искомого сплайна накладывались технические ограничения для обеспечения нормальной эксплуатации проектируемого нового или реконструируемого сооружения.

В первых работах по проектированию плана трассы рассматривались графики кривизны [6–8], на основе которых пытались определить прямые вставки. Эта идея не получила дальнейшего развития, т.к. в сложных случаях при обычной съемке точек через 20 м крайне затруднительно на сбитой трассе, даже визуально, найти прямую вставку длиной 30–35 м, особенно при сопряжении кривых одного знака.

Далее разработчики программ перешли к построению угловых диаграмм [9], т.е. графиков зависимости угла текущего элемента ломаной с осью OX от расстояния (длины ломаной) от начальной точки. На таких

графиках прямой в плане трассы соответствует горизонтальная прямая, окружности – наклонная прямая, а клотоиде – парабола второй степени. Ставилась задача определить границы элементов и выполнить расчет сплайна.

Следует отметить одну из последних работ по автоматизации проектирования плана трасс реконструируемых железных дорог, выполненную китайским профессором Хао Пу и его соавторами [4]. В статье представлен анализ работ в этой области и сделан вывод о том, что существующие методы не позволяют решать задачу автоматически и могут генерировать только локально оптимизированное решение с учетом нескольких ограничений. Кроме того, в [4] отмечено, что автоматическое определение числа кривых, длин окружностей, клотоид и прямых вставок представляет собой сложную задачу. Поэтому предложено на первом этапе осуществлять поиск числа элементов сплайна (круговых кривых, без учета наличия клотоид) с помощью эвристического алгоритма с дальнейшей оптимизацией результата с применением генетических алгоритмов [10–19]. В соответствии с [4] предварительно по угловой диаграмме определяются приближенно границы прямых и предлагается эвристический алгоритм, называемый *swing iteration*, для переклассификации размещения точек и определения более точно положения прямых, а затем – круговых и переходных кривых. В итерации качания граница сегмента геометрического элемента многократно изменяется слева направо, затем справа налево и, наконец, стабилизируется. Как следует из [4], на реальной задаче именно генетические алгоритмы позволили существенно улучшить результат первого этапа.

Представляется более надежной такая же двух-этапная схема решения задачи, но с применением математически корректных алгоритмов: на первом этапе – алгоритмов динамического программирования для определения числа элементов и приближенных значений их параметров, а на втором этапе – алгоритмов нелинейного программирования для оптимизации полученных параметров сплайна. Такая схема была успешно использована при проектировании продольного профиля железных и автомобильных дорог. При проектировании железных дорог первоначально использовался сплайн в виде ломаной линии [20], а при переходе к проектированию высокоскоростных дорог пришлось перейти к сплайну, состоящему из вертикальных круговых кривых, сопрягаемых прямыми [1]. При проектировании продольного профиля автодорог использовался сплайн, элементами которого были параболы второй степени [21].

Для компьютерного проектирования плана трассы актуальной является задача сплайн-аппроксимации многозначных функций, т.к. в общем

¹ Bentley Rail Track. URL: <https://www.bentley.com/-media/1EA2B937CB5B42BEA5EAE802620C0BA3.ashx>, дата обращения 15.01.2022. [Bentley Rail Track. URL: <https://www.bentley.com/-media/1EA2B937CB5B42BEA5EAE802620C0BA3.ashx>. Accessed January 15, 2022.]

² CARD/1. URL: <http://card-1.ru/>, дата обращения 15.01.2022. [CARD/1. URL: <http://card-1.ru/>. Accessed January 15, 2022 (in Russ.).]

³ Autodesk. URL: <https://www.architect-design.ru/autodesk/autocad/>, дата обращения 15.01.2022. [Autodesk. URL: <https://www.architect-design.ru/autodesk/autocad/>. Accessed January 15, 2022 (in Russ.).]

⁴ Topomatic Robur. URL: <http://www.topomatic.ru/>, дата обращения 15.01.2022. [Topomatic Robur. URL: <http://www.topomatic.ru/>. Accessed January 15, 2022 (in Russ.).]

⁵ Credo-Dialog. URL: <https://credo-dialogue.ru/>, дата обращения 15.01.2022. [Credo-Dialog. URL: <https://credo-dialogue.ru/>. Accessed January 15, 2022 (in Russ.).]

случае план трассы является графиком именно такой функции.

Сплайн становится многозначной функцией не только при наличии кривых с углами поворота касательной с осью OX большими 90° , но и при наличии нескольких кривых одного знака с малыми величинами углов поворота, но при большом суммарном угле поворота. В общем случае приходится рассматривать и кривые с углами поворота большими 180° .

Цель настоящей статьи состоит в изложении особенностей применения динамического программирования для решения этой задачи. Сначала рассматривается сплайн, состоящий из дуг окружностей, сопрягаемых прямыми, который является многозначной функцией. Эта задача имеет самостоятельное значение, т.к. при проектировании плана трассы некоторых линейных сооружений, например, траншей для прокладки трубопроводов различного назначения, кривые переменной кривизны, в т.ч. клотоиды, не используются. Эта задача существенно проще и требует значительно меньшего объема вычислений на первом этапе, чем при использовании сплайна с клотоидами. Кроме того, при использовании клотоид малой длины и больших радиусов круговых кривых вставка клотоид приводит к незначительным сдвигам полученного сплайна с окружностями, т.к. отклонение p окружности радиуса R от стороны угла, в который она вписывается с клотоидой длиной l , вычисляется по известной формуле: $p = l^2/(24R)$. Так при $l = 30$ м и $R = 500$ м выполняется $p < 0.08$ м.

Поэтому сплайн с окружностями, как правило, можно рассматривать как начальное приближение для второго этапа. В любом случае число кривых в дальнейшем не изменится и можно повторить первый этап при известном числе элементов для поиска сплайна с клотоидами.

При этом резко сокращается объем вычислений с использованием динамического программирования, т.к. при известном числе элементов не нужно рассматривать возможность замены двух кривых одной.

Оптимизация параметров сплайна как многозначной функции с применением нелинейного программирования представляет собой сложную задачу, решению которой будет посвящена отдельная статья.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЕ ФОРМАЛИЗАЦИЯ

Для заданной последовательности точек на плоскости (рис. 1) найти такой сплайн, состоящий из дуг окружностей, сопрягаемых отрезками прямых, параметры которого удовлетворяют системе ограничений, а сумма квадратов отклонений заданных точек от сплайна минимальна. Если есть участки,

на которых наиболее важно получить небольшие отклонения, то вместо простой суммы квадратов может использоваться взвешенная. Более того, можно задать и ограничения в виде неравенств на отклонения в отдельных точках. К сожалению, на данном этапе нельзя зафиксировать точку в пределах дискрета поиска.

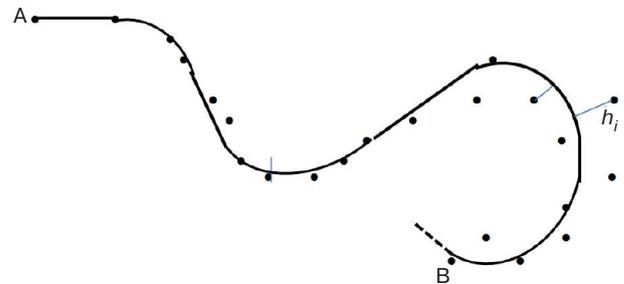


Рис. 1. Исходные точки и аппроксимирующий сплайн

Начальная A и конечная B точки и направления в них заданы и не меняются в процессе поиска сплайна. Они могут как совпадать, так и не совпадать с исходными точками.

Отклонения вычисляются по нормали к сплайну. Если число точек равно n , а отклонения их от сплайна – h_i ($i = 1, 2, \dots, n$), то сумма $\sum_{i=1}^n h_i^2$ должна быть минимальна при выполнении следующих ограничений на параметры сплайна: длины отрезков прямых и дуг окружностей не должны быть меньше заданных величин, радиусы круговых кривых должны быть в заданных пределах.

На первом этапе элементы удобно рассматривать в следующем порядке: «кривая + прямая» и т.д. Если число таких связей равно k , длины прямых L_j^{np} , длины кривых L_j^k , а радиусы R_j , то ограничения на параметры сплайна формализуются системой неравенств:

$$L_j^{np} \geq L_{\min}^{np}, \quad (1)$$

$$L_j^k \geq L_{\min}^k, \quad (2)$$

$$R_{\min} \leq |R_j| \leq R_{\max} \quad (j = 1, 2, \dots, k). \quad (3)$$

Радиусы кривых положительны при движении против часовой стрелки и отрицательны в противном случае. Все предельные значения L_{\min}^{np} , L_{\min}^k , R_{\min} и R_{\max} заданы.

Очевидно, что для определения положения сплайна на плоскости достаточно найти координаты точки начала каждой кривой и направления касательной в ней. Начало первой кривой считается заданным. Это может быть точка A (рис. 1) или другая точка на касательной, проведенной из точки A .

Если же на данном этапе считать неизвестной длину начальной прямой, то, как станет ясно из дальнейшего, задача существенно усложняется. Однако можно избежать существенных усложнений, задавая несколько возможных точек начала первой кривой и тем самым – длины начальной прямой. Аналогично можно поступить и с конечной точкой. Более того, можно задать и несколько начальных и конечных направлений.

Основное понятие в динамическом программировании – «состояние системы» – определим как совокупность точки начала очередной кривой и направления касательной к кривой в этой точке. Для этого в исходных точках построим нормали к заданной ломаной. Нормаль – это прямая, соединяющая данную точку с центром окружности, проведенной через три смежные точки, если они не лежат на одной прямой, или нормаль к этой прямой в противном случае (рис. 2). Нет необходимости строить нормали в начале и конце трассы на участках длиной $L_{\min} = L_{\min}^{\text{ПР}} + L_{\min}^{\text{К}}$ от начальной и конечной точек соответственно, т.к. на этих участках не могут располагаться искомые точки начала кривых из-за ограничений (1)–(3).

Поскольку начальное направление задано, то, двигаясь от начала к концу в каждой точке, можно определить направление внешней нормали и соответственно касательной, так чтобы они составляли правую тройку. Углы внешних нормалей с осью OX (γ_j на рис. 2) вычисляются предварительно. Направление касательной определяется углом $(\gamma_j - \pi/2)$ с осью OX . Координаты исходной точки и направление касательной определяют на каждой нормали одно «состояние системы». Поскольку начало кривой не обязано совпадать с исходной точкой, то на каждой из нормалей зададим несколько точек с шагом Δ (рис. 2) и в каждой точке на каждой нормали несколько возможных направлений касательной (стороны угла, в который будет вписываться окружность).

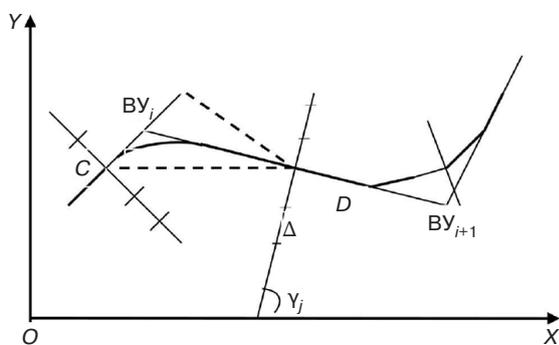


Рис. 2. Задание нормалей и множества «состояний системы»

Таким образом строится множество возможных состояний. Поиск сплайна сводится к задаче

динамического программирования: построить траекторию (последовательность состояний) для перевода «системы» из начального состояния в конечное с минимальными затратами (при минимуме целевой функции). Последовательные состояния должны выбираться с соблюдением ограничений (1)–(3) и ограничений на смещения в отдельных точках, если они заданы.

ПОСТРОЕНИЕ СПЛАЙНА ПО МЕТОДУ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

При построении траектории из начальной точки в конечную в соответствии с принципом оптимальности Р. Беллмана [22] рассматриваются и сравниваются варианты достижения одного и того же состояния разными допустимыми по ограничениям путями, и в каждом состоянии в итоге остается один вариант с меньшим значением целевой функции.

Для реализации этого правила нам требуется задать еще несколько параметров: уже упоминавшиеся дискреты по нормалям Δ и углам ϕ и их количества на нормали, $maxrix$ – максимальное допустимое отклонение сплайна от точек съемки и L_{\max} – максимальную длину связки «окружность + прямая», т.е. максимальное расстояние (по исходной ломаной) между двумя последовательными состояниями (началами кривых). Обычно $L_{\max} = (3-4)L_{\min}$, но при наличии длинных кривых может быть и больше. В силу простоты алгоритма (малого объема вычислений) целесообразно задавать L_{\max} «с запасом» и ограничивать длину связки, если на L_{\max} уже построены две кривых разного знака, т.к. такие кривые не могут быть заменены одной связкой с допустимыми отклонениями. Величина $maxrix$ задает область поиска на плоскости относительно исходной ломаной. Эта величина также должна задаваться осмысленно при анализе конкретных данных. Если задать малые значения, то из-за ограничений решение в соответствующей области может отсутствовать. Задание больших величин $maxrix$ не влияет на точность поиска, но приводит к увеличению объема вычислений, что в данном случае не очень существенно.

Первый шаг алгоритма

Для начальной точки А, а если начальных точек задано несколько, то последовательно для каждой из них, рассматриваем нормали в интервале от L_{\min} до L_{\max} (точки С и D на рис. 3). Для каждой точки на каждой нормали и каждого направления касательной в этой точке определяем соответствующую вершину угла поворота (далее – ВУ) при пересечении с начальным направлением. На рис. 3 это точки V_1 и V_2 . Некоторые другие направления показаны пунктиром.

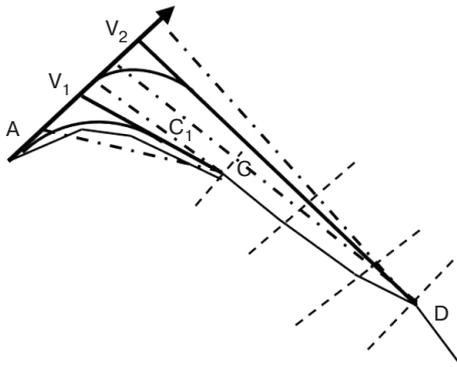


Рис. 3. Построение вариантов на первом шаге алгоритма

Для каждой ВУ определяем расстояния от нее до начальной точки и до точки на нормали. Применительно к первой вершине это расстояния AV_1 и V_1C соответственно. Если выполняется $AV_1 > V_1C_1 - L_{\min}^{pp}$, то этот вариант выбора начальных точек отбраковывается. В противном случае на стороне угла V_1C находим точку C_1 такую, что $AV_1 = V_1C_1$.

Расстояние CC_1 – это длина прямой в искомой связке «окружность + прямая».

$$AV_1 = R \operatorname{tg}(\alpha/2),$$

где α – угол поворота, т.е. разность углов сторон угла с осью OX . Отсюда находим R , а затем и центр окружности, используя точку A и нормаль к начальному направлению. Никакого перебора значений радиуса не требуется. Именно для этого мы фиксировали точку начала кривой и вместо ее поиска предпочли рассмотреть несколько заданных вариантов. Если не выполняется ограничение (3) (по радиусу) или ограничение (2) (по длине кривой), то переходим к рассмотрению следующего состояния. Отметим, что при нарушении ограничений многие состояния исключаются из рассмотрения.

Если ограничения (1)–(3) выполнены, то для исходных точек на рассматриваемом интервале (AC на рис. 3) находим последовательно расстояния h_i до дуги окружности (до выхода за пределы дуги), а затем расстояния до прямой вставки для оставшихся точек. Если $h_i > \max rix$, или нарушены ограничения на смещение некоторых точек, то остальные расстояния не вычисляются, и этот вариант расположения точек начала кривых отбраковывается. В противном случае вычисляется и запоминается значение целевой функции и вся информация, необходимая для восстановления сплайна в дальнейшем (радиус, координаты конца дуги C_1 и др.).

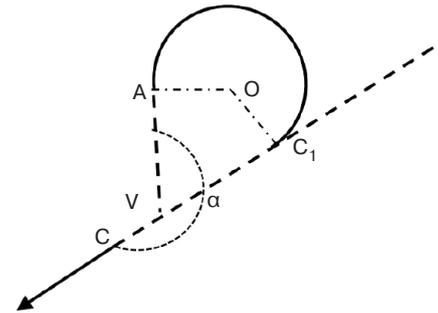


Рис. 4. Расчет при углах поворота больше π

Если угол поворота $\alpha > \pi$ (рис. 4), то особых сложностей не возникает. В этом случае $AV = R |\operatorname{tg}(\pi - \alpha/2)| = R |\operatorname{tg}(\alpha/2)|$, прямая вставка – CC_1 , а длина дуги $L = R\alpha$. Следовательно, проверка ограничений (1)–(3) выполняется так же, как и при малых углах поворота. В теоретически возможном случае $\alpha = \pi$ (рис. 5) вершины угла нет, радиус равен половине расстояния между параллельными прямыми, длина дуги $L = \pi R$. Прямая вставка CC_1 , величины R и L могут оказаться недопустимыми. Вычисление отклонений от точек съемки выполняется также, как и ранее.

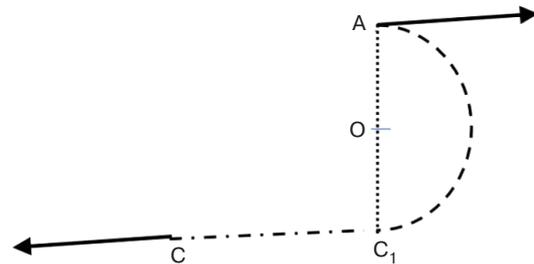


Рис. 5. Расчет при параллельных прямых

Отметим, что сравнения вариантов и их отбраковки по значению целевой функции на первом шаге нет.

Общий шаг алгоритма

На последующих шагах рассматриваются все нормали в интервале от $2L_{\min}$ до $S - L_{\min}$, где S – длина исходной ломаной. Для каждой такой нормали анализируются возможности построения связки «окружность + прямая», точка начала которой принадлежит предшествующей нормали, отстоящей от рассматриваемой не менее чем на L_{\min} и не более чем на L_{\max} . Отличие от первого шага алгоритма в том, что теперь для каждой точки и направления на рассматриваемой нормали есть много вариантов левой стороны угла вместо одного. Все допустимые варианты перехода в рассматриваемое состояние из предшествующих состояний сравниваются по целевой функции, и наилучший из них запоминается.

При этом запоминается и соответствующее состояние начала построенной связки. Другими словами, происходит отбраковка не только недопустимых по ограничениям, но и неэффективных переходов. Может оказаться, что в одно и то же состояние приводят два допустимых пути, состоящих из разного числа связок. Это означает, что в процессе динамического программирования рассматриваются траектории с различным числом элементов, и в итоге определяется число элементов аппроксимирующего сплайна, которое было неизвестно.

На последнем шаге выполняются те же действия для конечного состояния или нескольких таких состояний, если они заданы. В итоге сравнения получается значение целевой функции для лучшего варианта траектории. Траектория, т.е. искомый сплайн, определяется обычным для динамического программирования обратным разворотом из найденного конечного наилучшего состояния по цепочке связей, так как для каждого состояния запоминали соответствующее ему начало кривой [20, 21].

СОКРАЩЕНИЕ ПЕРЕБОРА ВАРИАНТОВ

Для рассматриваемой задачи и алгоритма динамического программирования характерно, что наличие ограничений не только не усложняет задачу, но и дает возможность резкого сокращения перебора вариантов. При неудачной попытке построить связку «дуга окружности + отрезок прямой» из-за нарушения ограничений многие переходы в другое состояние (смещение по правой нормали или повороты касательной, рис. 3) оказываются заведомо нецелесообразны, т.к. при таком переходе ограничения останутся нарушенными. Например, при вписывании в угол нарушено ограничение по минимальному радиусу. Очевидно, что при неизменном угле поворота α нельзя уменьшать тангенту T (расстояние от точки касания до ВУ), т.к. $R = T/\text{tg}(\alpha/2)$. Соответственно оказываются недопустимыми смещения по правой нормали, например, влево от точки C , уменьшающие T .

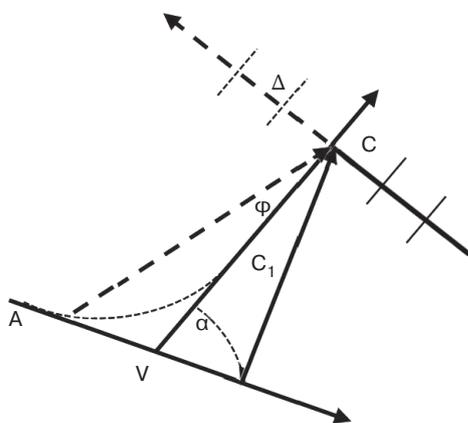


Рис. 6. Отбраковка переходов при нарушении ограничений

На рис. 6 $T = AV$. Ненужные при $R < R_{\min}$ переходы в новое состояние из точки C (смещения по нормали и повороты касательной) показаны пунктиром. Если же прямая вставка C_1C меньше допустимой, ограничения по радиусам и длине кривой выполнены, то, наоборот, только отмеченные пунктиром смещения и повороты дают ее увеличение. Однако при этом уменьшаются тангента AV и длина кривой, поэтому «запаса» по этим параметрам может не хватить.

При любом расположении нормалей и различных углах поворота каждое нарушенное ограничение дает информацию о том, в какие состояния на данной нормали переход нецелесообразен. Такой анализ несколько усложняет алгоритм построения сплайна, что вполне окупается сокращением перебора вариантов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенный способ аппроксимации последовательности точек на плоскости сплайном с окружностями и прямыми может использоваться не только в проектировании трасс линейных сооружений, но и вообще при обработке данных любого типа при построении траекторий. Что касается его практического применения в проектировании трасс линейных сооружений, то как и в случае с другими проектирующими программами, вопрос остается открытым и упирается в отсутствие заинтересованных потребителей.

В будущем в России возможно увеличение объемов проектных работ в рамках нового строительства и реконструкции трасс железных и автомобильных дорог. Следствием этого будет повышение заинтересованности соответствующих инстанций в снижении затрат в строительстве за счет оптимизации проектных решений, что делает актуальным разработку новых проектирующих алгоритмов и программ.

Для их создания нужны теоретические и экспериментальные исследования специализированными научными подразделениями, как это было до 1990-х гг. Первые российские разработки в области оптимизации проектных решений существенно опережали зарубежные. Однако и в настоящее время зарубежные авторы предлагают в основном разного рода эвристические алгоритмы, не используя достижения современной математики. Представленная статья и ее продолжение – оптимизация сплайнов с дугами окружностей и прямыми при аппроксимации многозначных функций с использованием нелинейного программирования – открывает путь к решению более сложной и более важной с теоретической и практической точек зрения задачи аппроксимации многозначных функций составными сплайнами с клотоидами. Это актуальная задача дальнейших исследований в данной области.

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

1. Карпов Д.А., Струченков В.И. Двухэтапная сплайн-аппроксимация в компьютерном проектировании трасс линейных сооружений. *Российский технологический журнал*. 2021;9(5):45–56. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-45-56>
2. Альберг Дж., Нильсон Э., Уолш Дж. *Теория сплайнов и ее приложения*: пер. с англ. М.: Мир; 1972. 312 с.
3. Хакимов Б.В. *Моделирование корреляционных зависимостей сплайнами на примерах в геологии и экологии*. СПб.: Нева; 2003. 144 с. ISBN 5-7654-2951-3
4. Pu H., Li W., Schonfeld P., et al. A method for automatically recreating the horizontal alignment geometry of existing railways. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2019;34(1):71–94. <https://doi.org/10.1111/mice.12392>
5. Струченков В.И., Баранов М.А., Рабинович В.С. Использование математических методов оптимизации и ЭВМ при проектировании продольного профиля железных дорог; под ред. Малявского Б.К. Серия: *Труды Всесоюзного научно-исследовательского института транспортного строительства*. Вып. 101. М.: Транспорт; 1977. 169 с.
6. Price M. Under construction: building and calculating turn radii. *ArcUser Magazine*. 2010;13(1):50–56. URL: <https://www.esri.com/news/arcuser/0110/turning.html>
7. Bosurgi G., D'Andrea A. A polynomial parametric curve (PPC-curve) for the design of horizontal geometry of highways. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2012;27(4):303–312. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2011.00750.x>
8. Imran M., Hassan Y., Patterson D. GPS-GIS-based procedure for tracking vehicle path on horizontal alignments. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2006;21(5):383–394. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2006.00444.x>
9. Othman S., Thomson R., Lanner G. Using naturalistic field operational test data to identify horizontal curves. *J. Transport. Eng.* 2012;138(9):1151–1160. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)te.1943-5436.0000408](https://doi.org/10.1061/(asce)te.1943-5436.0000408)
10. Vázquez-Méndez M.E., Casal G., Castro A. An algorithm for random generation of admissible horizontal alignments for optimum layout design. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2021;36(8):1056–1072. <https://doi.org/10.1111/mice.12682>
11. Jha M.K., McCall C., Schonfeld P. Using GIS, genetic algorithms, and visualization in highway development. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2001;16(6):399–414. <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00242>
12. Jha M.K., Schonfeld P. A highway alignment optimization model using geographic information systems. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2004;38(6):455–481. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2004.04.001>
13. Jong J.C., Jha M.K., Schonfeld P. Preliminary highway design with genetic algorithms and geographic information systems. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2000;15(4):261–271. <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00190>

REFERENCES

1. Karpov D.A., Struchenkov V.I. Two-stage spline approximation in linear structure routing. *Russian Technological Journal*. 2021;9(5):45–56 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-45-56>
2. Ahlberg J.H., Nilson E.N., Walsh J.L. *The theory of splines and their applications*. Academic press; 1967. 296 p. [Ahlberg J., Nilson E., Walsh J. *Teoriya splainov i ee prilozheniya (The theory of splines and their applications)*: transl. from Engl. Moscow: Mir; 1972. 312 p. (in Russ.)]
3. Khakimov B.V. *Modelirovanie korrelyatsionnykh zavisimostei splainami na primerakh v geologii i ekologii (Modeling of correlation dependences by splines on examples in geology and ecology)*. St. Petersburg: Neva; 2003. 144 p. (in Russ.). ISBN 5-7654-2951-3.
4. Pu H., Li W., Schonfeld P., et al. A method for automatically recreating the horizontal alignment geometry of existing railways. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2019;34(1):71–94. <https://doi.org/10.1111/mice.12392>
5. Struchenkov V.I., Baranov M.A., Rabinovich V.S. The use of mathematical optimization methods and a computer in the design of the longitudinal profile of railways. Malyavskii B.K. (Ed.). *Seriya: Trudy Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta transportnogo stroitel'stva = Series: Proceedings of the All Union Scientific Research Institute of Transport Construction*. Iss. 101. Moscow: Transport; 1977. 169 p. (in Russ.)
6. Price M. Under construction: building and calculating turn radii. *ArcUser Magazine*. 2010;13(1):50–56. Available from URL: <https://www.esri.com/news/arcuser/0110/turning.html>
7. Bosurgi G., D'Andrea A. A polynomial parametric curve (PPC-curve) for the design of horizontal geometry of highways. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2012;27(4):303–312. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2011.00750.x>
8. Imran M., Hassan Y., Patterson D. GPS-GIS-based procedure for tracking vehicle path on horizontal alignments. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2006;21(5):383–394. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2006.00444.x>
9. Othman S., Thomson R., Lanner G. Using naturalistic field operational test data to identify horizontal curves. *J. Transport. Eng.* 2012;138(9):1151–1160. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)te.1943-5436.0000408](https://doi.org/10.1061/(asce)te.1943-5436.0000408)
10. Vázquez-Méndez M.E., Casal G., Castro A. An algorithm for random generation of admissible horizontal alignments for optimum layout design. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2021;36(8):1056–1072. <https://doi.org/10.1111/mice.12682>
11. Jha M.K., McCall C., Schonfeld P. Using GIS, genetic algorithms, and visualization in highway development. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2001;16(6):399–414. <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00242>
12. Jha M.K., Schonfeld P. A highway alignment optimization model using geographic information systems. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2004;38(6):455–481. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2004.04.001>

14. Kang M.W., Schonfeld P., Yang N. Prescreening and repairing in a genetic algorithm for highway alignment optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2009;24(2):109–119. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00574.x>
15. Pushak Y., Hare W., Lucet Y. Multiple-path selection for new highway alignments using discrete algorithms. *Eur. J. Operational Res.* 2016;248(2):415–427. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.039>
16. Sarma K.C., Adeli H. Bilevel parallel genetic algorithms for optimization of large steel structures. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2001;16(5):295–304. <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00234>
17. Shafahi Y., Bagherian M. A customized particle swarm method to solve highway alignment optimization problem. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2013;28(1):52–67. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2012.00769.x>
18. Audet C., Hare W. *Derivative-Free and Blackbox Optimization*. Springer Series in Operations Research and Financial Engineering. Springer International Publishing; 2017. 302 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68913-5>
19. Cerf R. The quasispecies regime for the simple genetic algorithm with roulette wheel Selection. *Advances in Applied Probability*. 2017;49(3):903–926. <https://doi.org/10.1017/apr.2017.26>
20. Струченков В.И. *Методы оптимизации трасс в САПР линейных сооружений*. М.: Солон- Пресс; 2014. 272 с. ISBN 978-5-91359-139-5
21. Struchenkov V.I. Piecewise parabolic approximation of plane curves with restrictions in computer-aided design of road routes. *Transaction Machine Learning and Artificial Intelligence*. 2013;1(1):16–26. URL: <http://scholarpublishing.org/index.php/TMLAI/article/view/10/TMLAI-13-1015>
22. Вентцель Е.С. *Исследование операций: задачи, принципы, методология*. М.: КноРус; 2010. 198 с. ISBN 978-5-406-00682-5
13. Jong J.C., Jha M.K., Schonfeld P. Preliminary highway design with genetic algorithms and geographic information systems. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2000;15(4):261–271. <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00190>
14. Kang M.W., Schonfeld P., Yang N. Prescreening and repairing in a genetic algorithm for highway alignment optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2009;24(2):109–119. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00574.x>
15. Pushak Y., Hare W., Lucet Y. Multiple-path selection for new highway alignments using discrete algorithms. *Eur. J. Operational Res.* 2016;248(2):415–427. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.039>
16. Sarma K.C., Adeli H. Bilevel parallel genetic algorithms for optimization of large steel structures. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2001;16(5):295–304. <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00234>
17. Shafahi Y., Bagherian M. A customized particle swarm method to solve highway alignment optimization problem. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2013;28(1):52–67. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2012.00769.x>
18. Audet C., Hare W. *Derivative-Free and Blackbox Optimization*. Springer Series in Operations Research and Financial Engineering. Springer International Publishing; 2017. 302 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68913-5>
19. Cerf R. The quasispecies regime for the simple genetic algorithm with roulette wheel Selection. *Advances in Applied Probability*. 2017;49(3):903–926. <https://doi.org/10.1017/apr.2017.26>
20. Struchenkov V.I. *Metody optimizatsii trass v SAPR lineinykh sooruzhenii (Methods for route optimization in CAD of linear structures)*. Moscow: Solon-Press; 2014. 272 p. (in Russ). ISBN 8-5-91359-139-5
21. Struchenkov V.I. Piecewise parabolic approximation of plane curves with restrictions in computer-aided design of road routes. *Transaction Machine Learning and Artificial Intelligence*. 2013;1(1):16–26. Available from URL: <http://scholarpublishing.org/index.php/TMLAI/article/view/10/TMLAI-13-1015>
22. Venttsel' E.S. *Issledovanie operatsii: zadachi, printsipy, metodologiya (Operations Research: Objectives, Principles, Methodology)*. Moscow: KnoRus; 2010. 198 p. (in Russ.). ISBN 978-5-406-00682-5

Об авторах

Карпов Дмитрий Анатольевич, к.т.н., заведующий кафедрой общей информатики Института искусственного интеллекта, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: karpov@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 2619-7100, <https://orcid.org/0000-0003-3734-7182>

Струченков Валерий Иванович, д.т.н., профессор кафедры общей информатики Института искусственного интеллекта, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: str1942@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 4581-4698, <https://orcid.org/0000-0002-9801-7454>

About the authors

Dmitry A. Karpov, Cand. Sci. (Eng.), Head of the General Informatics Department, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: karpov@mirea.ru. RSCI SPIN-code 2619-7100, <https://orcid.org/0000-0003-3734-7182>

Valery I. Struchenkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, General Informatics Department, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: str1942@mail.ru. RSCI SPIN-code 4581-4698, <https://orcid.org/0000-0002-9801-7454>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 004.023+519.677
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-75-85>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Свойства целевых функций и алгоритмов поиска в задачах многокритериальной оптимизации

А.В. Смирнов[@]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Часто применяемый метод поиска оптимальных по Парето решений состоит в минимизации выбранного показателя качества при задании ограничений на остальные показатели, значения которых, таким образом, оказываются заранее определенными. При этом выполняется поиск глобального минимума скалярной целевой функции, в которую ограничиваемые показатели входят в виде штрафных слагаемых. Рельеф такой функции содержит участки быстрого роста, значительно затрудняющие поиск глобального минимума. В работе сравниваются результаты различных эвристических алгоритмов при решении задач этого типа. Кроме того, исследуется возможность использования алгоритма последовательного квадратичного программирования (SQP), в котором ограничения учитываются не через штрафные слагаемые, а включаются в функцию Лагранжа.

Методы. В экспериментах использовались две аналитически заданные целевые функции и две целевые функции, встречающиеся в задачах многокритериальной оптимизации характеристик аналоговых фильтров. Исследуемые алгоритмы были реализованы программами в среде *MATLAB*.

Результаты. Установлено, что единственным эвристическим алгоритмом, который нашел оптимальные решения для всех функций, оказался алгоритм роя частиц. Алгоритм SQP оказался применим для одной из аналитически определенных функций и для одной из целевых функций оптимизации фильтров, существенно превзойдя при этом эвристические алгоритмы по точности и скорости поиска решения. Но для двух других функций данный алгоритм оказался неспособным находить правильные решения.

Выводы. Актуальной является задача оценки применимости рассмотренных методов для поиска Парето-оптимальных решений на основе предварительного анализа свойств функций, определяющих показатели качества.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, оптимальность по Парето, показатель качества, целевая функция, рельеф целевой функции, эвристический алгоритм, квадратичное программирование

• Поступила: 15.12.2021 • Доработана: 13.05.2022 • Принята к опубликованию: 27.06.2022

Для цитирования: 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>

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Properties of objective functions and search algorithms in multi-objective optimization problems

Alexander V. Smirnov [®]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. A frequently used method for obtaining Pareto-optimal solutions is to minimize a selected quality index under restrictions of the other quality indices, whose values are thus preset. For a scalar objective function, the global minimum is sought that contains the restricted indices as penalty terms. However, the landscape of such a function has steep-ascent areas, which significantly complicate the search for the global minimum. This work compared the results of various heuristic algorithms in solving problems of this type. In addition, the possibility of solving such problems using the sequential quadratic programming (SQP) method, in which the restrictions are not imposed as the penalty terms, but included into the Lagrange function, was investigated.

Methods. The experiments were conducted using two analytically defined objective functions and two objective functions that are encountered in problems of multi-objective optimization of characteristics of analog filters. The corresponding algorithms were realized in the MATLAB environment.

Results. The only heuristic algorithm shown to obtain the optimal solutions for all the functions is the particle swarm optimization algorithm. The sequential quadratic programming (SQP) algorithm was applicable to one of the analytically defined objective functions and one of the filter optimization objective functions, as well as appearing to be significantly superior to heuristic algorithms in speed and accuracy of solutions search. However, for the other two functions, this method was found to be incapable of finding correct solutions.

Conclusions. A topical problem is the estimation of the applicability of the considered methods to obtaining Pareto-optimal solutions based on preliminary analysis of properties of functions that determine the quality indices.

Keywords: multi-objective optimization, Pareto optimality, quality index, objective function, fitness landscape, heuristic algorithm, quadratic programming

• Submitted: 15.12.2021 • Revised: 13.05.2022 • Accepted: 27.06.2022

For citation: Smirnov A.V. Properties of objective functions and search algorithms in multi-objective optimization problems. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):75–85. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-75-85>

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

Для поиска глобальных экстремумов мульти-модальных (имеющих много локальных экстремумов) целевых функций (ЦФ), применяют эвристические алгоритмы [1, 2]. В отличие от классических методов оптимизации [2–4], для эвристических алгоритмов отсутствует полноценный теоретический анализ. Оценку и сравнение их характеристик осуществляют экспериментально с применением наборов тестовых функций [5, 6]. При этом на разных тестовых функциях лучшие характеристики показывают разные алгоритмы, что приводит к задаче выбора наиболее подходящего алгоритма для ЦФ

с определенными свойствами. В последнее время развиваются методы автоматического анализа свойств рельефа ЦФ (exploratory landscape analysis – ELA) и машинного обучения для выбора алгоритма и/или настройки его параметров в соответствии с результатами такого анализа [7, 8]. Однако до полного решения указанной задачи еще далеко.

В радиотехнике и в других областях значительный интерес представляют задачи многокритериальной оптимизации [9]. Оптимизировать одновременно все показатели качества (ПК), как правило, невозможно, т.к. улучшение одних ПК приводит к ухудшению других. Поэтому целью многокритериальной оптимизации является множество решений,

оптимальных по Парето [1, 10]. Широко применяемый способ их поиска состоит в решении задачи

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^* &= \arg \min_{\mathbf{x} \in D'} (Q_k(\mathbf{x})), \\ D' &= \left\{ \mathbf{x} \in D \mid Q_j(\mathbf{x}) \leq Q_{jt}; i = 1, \dots, M; j \neq k \right\}. \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{x} – вектор координат в пространстве поиска; D – область допустимых значений \mathbf{x} в пространстве поиска, определяемая ограничениями в виде неравенств и/или равенств; $Q_j(\mathbf{x})$ – функции, описывающие ПК; M – количество ПК; \mathbf{x}^* – вектор координат оптимального решения. Без потери общности здесь рассматривается задача минимизации всех ПК.

В задаче (1) задаются ограничения сверху на все ПК, кроме Q_k , который минимизируется. Если ПК конкурирующие, то минимум Q_k будет в точке \mathbf{x}^* , в которой остальные ПК достигают заданных для них ограничений Q_{jt} . Это позволяет получать решения, у которых все координаты в пространстве ПК, кроме k -й, фиксированы на целевых значениях Q_{jt} . Известно, что таким способом может быть найдено любое Парето-оптимальное решение [10].

Один из методов решения задачи (1) основан на минимизации скалярной ЦФ вида

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^M \left(W_j \cdot \max \left(\frac{(Q_j(\mathbf{x}) - Q_{jt})}{Q_{jt}^{q_j}}, 0 \right) \right), \quad (2)$$

где $Q_j(\mathbf{x})$ и Q_{jt} – текущее и целевое значения j -го ПК; W_j – весовой коэффициент j -го ПК [2, 10]. В случае, если необходимо нормировать отклонение ПК от целевого значения для приведения слагаемых в (2) к одному диапазону величин, показатель степени $q_j = 1$. Если такая нормировка не требуется, то показатель степени $q_k = 0$, Значение $\max(x, 0) = x$ при $x > 0$ и $\max(x, 0) = 0$ – в противоположном случае.

Целевое значение минимизируемого ПК Q_{kt} задается достаточно малым, например, равным его минимально возможному значению, а значение весового коэффициента устанавливается $W_k = 1$. Слагаемые, содержащие остальные ПК, являются штрафами за нарушение наложенных на них ограничений. Весовые коэффициенты в них должны удовлетворять условиям $W_j \gg 1$, чтобы обеспечить фиксацию таких ПК вблизи целевых значений.

Решение задач многокритериальной оптимизации характеристик аналоговых и цифровых фильтров с использованием метода скалярной ЦФ было предметом работ [11, 12].

Рельеф ЦФ (2) может оказаться сложным. При превышении целевых значений, фиксируемых ПК, значение ЦФ быстро нарастает, в результате чего в рельефе присутствуют участки, называемые далее

«стенами». В известных автору работах по анализу свойств ЦФ и выбору алгоритмов оптимизации такие свойства ЦФ не исследовались. Учитывая актуальность многокритериальной оптимизации, данный пробел необходимо заполнить.

Другой подход к решению задачи (1) основан на использовании методов нелинейного программирования, в которых ограничения на ПК учитываются не в виде штрафных слагаемых, а включаются в функцию Лагранжа, принимающую применительно к задаче (1) вид

$$\begin{aligned} L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) &= Q_k(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^{M-1} \lambda_i g_i(\mathbf{x}), \\ g_i(\mathbf{x}) &= Q_j(\mathbf{x}) - Q_{jt}, i = 1, \dots, M-1, j = 1, \dots, M, j \neq k, \\ \mathbf{x} &\in D, \end{aligned} \quad (3)$$

где λ_i – множители Лагранжа. Для поиска минимума функции (3) применяют, в частности, алгоритм последовательного квадратичного программирования (sequential quadratic programming – SQP) [3]. При этом необходимо, чтобы функция Лагранжа $L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})$ имела непрерывные вторые частные производные.

Следует также упомянуть такую альтернативу методу скалярной ЦФ, как применение популяционных алгоритмов, позволяющих получать в одном цикле поиска аппроксимацию множества Парето, содержащую заданное количество элементов [1]. Преимуществом этих методов является существенное ускорение поиска. Однако возникают трудности с получением решений с заданными значениями части ПК. Кроме того, при увеличении количества ПК качество находимых аппроксимаций множества Парето может снижаться. Так, сравнение результатов решения задачи многокритериальной оптимизации характеристик электрических фильтров с применением популяционных алгоритмов и метода скалярной ЦФ показало, что при количестве ПК $M = 2$ популяционные алгоритмы имеют преимущество не только в скорости поиска, но и в качестве получаемых решений. В то же время при $M = 3$ они уступают по качеству аппроксимации множества Парето методу скалярной функции [13]. Перспективы применения популяционных алгоритмов многокритериальной оптимизации требуют дальнейших исследований и здесь рассматриваться не будут.

Цель данной работы – исследовать характеристики различных алгоритмов оптимизации при поиске глобального минимума скалярных ЦФ типа (2), рельеф которых характеризуется наличием «стен», и выработать рекомендации по выбору алгоритмов для решения таких задач. Кроме того, необходимо изучить возможности применения методов решения задачи (1), не использующих штрафные слагаемые.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В первую очередь сформируем ЦФ, обладающие нужными свойствами, т.е. наличием «стен». Первые две ЦФ заданы аналитически

$$f_1(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{ND} x_i + W_1 \cdot \max\left(\sum_{i=1}^{ND} x_i^2 - a_1, 0\right), \quad (4)$$

$$f_2(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{ND} x_i + W_2 \cdot \max\left(ND + \sum_{i=1}^{ND} (x_i^2 - \cos 2\pi x_i) - a_2, 0\right). \quad (5)$$

В этих соотношениях ND – размерность пространства поиска. Минимизируемый ПК в обеих функциях рассчитывается как сумма координат вектора \mathbf{x} . Фиксируемый ПК в функции $f_1(\mathbf{x})$ определен как сумма квадратов координат, а в функции $f_2(\mathbf{x})$ представляется известной тестовой функцией Растригина [5]. Параметры a_1 и a_2 задают целевые значения фиксируемых ПК, а параметры W_1 и W_2 – весовые коэффициенты штрафных слагаемых.

На рис. 1 приведены графики ЦФ $f_1(\mathbf{x})$ и $f_2(\mathbf{x})$ для случая $ND = 2$ при $a_1 = 1, a_2 = 2, W_1 = W_2 = 100, -2 \leq x_i \leq 2, i = 1, 2$. На графиках значения функций ограничены сверху на уровнях $f_1(\mathbf{x}) = 1, f_2(\mathbf{x}) = 2$. Рельефы обеих функций содержат выраженные «стены». Количество локальных экстремумов $f_2(\mathbf{x})$ экспоненциально растет при увеличении размерности ND .

Далее определим две ЦФ, получающиеся в задачах многокритериальной оптимизации

характеристик аналоговых электрических фильтров [11]. Первая из них имеет вид

$$f_3(\mathbf{x}) = \frac{DTd(\mathbf{x}) - DTd_t}{DTd_t} + WHp \cdot \max\left(\frac{DHP(\mathbf{x}) - DHP_t}{DHP_t}, 0\right) + WHs \cdot \max\left(\frac{HS_t - Hs(\mathbf{x})}{Hs_t}, 0\right) + WHt \cdot \max(DHt(\mathbf{x}) - DHt_t, 0). \quad (6)$$

Здесь DHP – неравномерность АЧХ в полосе пропускания (дБ); Hs – ослабление в полосе задерживания (дБ); DHt – превышение АЧХ над допустимым уровнем в полосе перехода от пропускания к затуханию (безразмерное); DTd – относительная неравномерность частотной характеристики задержки в полосе пропускания (%). Вектор координат \mathbf{x} состоит из действительных и мнимых координат полюсов и нулей передаточной функции (по одному из комплексно-сопряженной пары). Методы расчета перечисленных ПК изложены в [11, 14].

ЦФ $f_3(\mathbf{x})$ (6) получается в задаче минимизации ПК DTd при задании ограничений на остальные три ПК. Значение Hs должно максимизироваться, поэтому данный ПК вычитается из своего целевого значения. В экспериментах, результаты которых приведены ниже, задавались число полюсов фильтра $NP = 6$; число нулей $NZ = 0$; целевые значения ПК $DHP_t = 0.5, Hs_t = 40, DHt_t = 1, DTd_t = 10$; весовые коэффициенты $WHp = 20, WHs = 500, WHt = 1000$. Пространство поиска по всем координатам ограничивалось неравенствами $-3 \leq x_i \leq -0.01$.

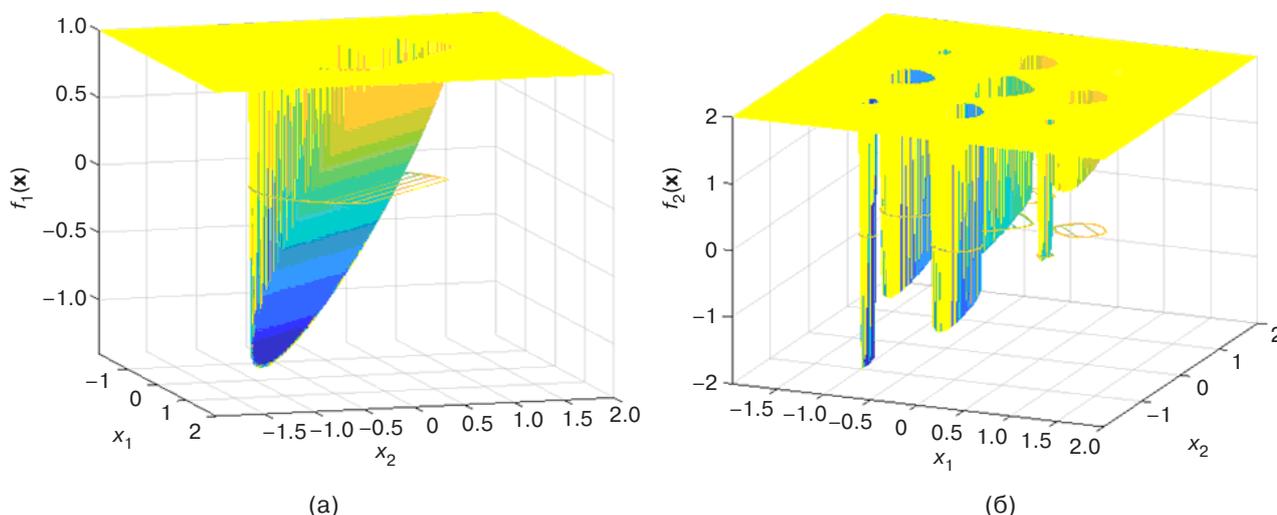


Рис. 1. Графики тестовых функций $f_1(\mathbf{x})$ (а) и $f_2(\mathbf{x})$ (б) при размерности $ND = 2$

Последняя ЦФ имеет вид

$$\begin{aligned}
 f_4(\mathbf{x}) = & \frac{T_{ss}(\mathbf{x}) - T_{ss}_t}{T_{ss}_t} + \\
 & + WT_{fr} \cdot \max\left(\frac{T_{fr}(\mathbf{x}) - T_{fr}_t}{T_{fr}_t}, 0\right) + \\
 & + WUm \cdot \max\left(\frac{Um(\mathbf{x}) - Um_t}{Um_t}, 0\right) + \\
 & + WHs \cdot \max\left(\frac{HS_t - Hs(\mathbf{x})}{Hs_t}, 0\right) + \\
 & + WHt \cdot \max(DHt(\mathbf{x}) - DHt_t, 0).
 \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь T_{ss} – длительность установления переходного процесса; T_{fr} – длительность нарастания фронта переходного процесса; Um – максимальное значение (выброс) напряжения переходного процесса. Интервалы времени и напряжение измеряются на нормированных шкалах и выражаются безразмерными величинами. Остальные ПК были определены выше.

ЦФ $f_4(\mathbf{x})$ (7) получается в задаче минимизации длительности установления переходного процесса T_{ss} при задании ограничений на длительность фронта T_{fr} , максимальное напряжение переходного процесса Um , ослабление в полосе задерживания Hs и выброс АЧХ в полосе перехода DHt . В экспериментах задавались число полюсов $NP = 6$; число нулей $NZ = 0$; целевые значения ПК $T_{ss}_t = 0.1$, $T_{fr}_t = 0.5$, $Um_t = 1.1$, $Hs_t = 40$, $DHt_t = 0$; весовые коэффициенты $WT_{fr} = 100$, $WUm = 10$, $WHs = 100$, $WHt = 1000$. Границы пространства поиска такие же, как для $f_3(\mathbf{x})$. Сведения о методах расчета ПК также можно найти в работах [11, 14].

Так как решение задач оптимизации ЦФ (6) и (7) при $ND = 2$, т.е. для фильтров 2-го порядка, не представляет интереса, а при больших размерностях графическое представление затруднительно, графики этих ЦФ не приводятся.

Далее перечислим исследованные алгоритмы оптимизации. Все они были реализованы в программной среде *MATLAB*¹. Для каждого алгоритма введено сокращенное обозначение, которое используется в дальнейшем изложении.

SS (Step Search) – простой алгоритм покоординатного поиска с ограниченной сверху длиной шага [2, 3].

PS – функция *patternsearch*(..) из модуля *Global Optimization Toolbox* в составе *MATLAB*. Усовершенствованный покоординатный поиск

с возможностью перехода между областями притяжения локальных экстремумов [2].

MS – функция *fminsearch*(..) из модуля *Optimization Toolbox*. Поиск минимума ЦФ с применением симплексного алгоритма Нелдера – Мида (Nelder–Mead) [2].

SA – функция *simulannealbnd*(..) из модуля *Global Optimization Toolbox*. Поиск глобального минимума ЦФ с применением алгоритма имитации процесса отжига [1, 2].

GA – функция *ga*(..) из модуля *Global Optimization Toolbox*. Поиск глобального минимума ЦФ с помощью генетического алгоритма [1, 2].

PSO – функция *particleswarm*(..) из модуля *Global Optimization Toolbox*. Поиск глобального минимума ЦФ с применением алгоритма роя частиц [1, 2].

CS – функция, реализующая алгоритм поиска глобального минимума ЦФ Cuckoo Search (алгоритм кукушек) [1]. Функция не входит в состав модулей *MATLAB* и написана на основе примера, приведенного в [15].

MC1 – функция *fmincon*(..) из модуля *Optimization Toolbox*, реализующая алгоритм SQP. В этом варианте минимизируется ЦФ со штрафами (4)–(7), а ограничения накладываются только на координаты пространства поиска.

MC2 – также функция *fmincon*(..) из модуля *Optimization Toolbox*. Но в этом варианте минимизируется выбранный ПК, а функции, по которым рассчитываются фиксируемые ПК, вводятся в состав аргументов *fmincon*(..) как ограничения в виде неравенств.

Каждый алгоритм запускался $NT = 100$ раз для функций $f_1(\mathbf{x})$ и $f_2(\mathbf{x})$ и $NT = 40$ раз для $f_3(\mathbf{x})$ и $f_4(\mathbf{x})$. Стартовые точки в пространстве поиска для каждого запуска непопуляционных алгоритмов задавались с применением функции формирования Латинского гиперкуба *lhsdesign*(NT , ND), а случайные стартовые положения агентов популяционных алгоритмов GA, PSO и CS задавались реализующими их функциями. Настройки алгоритмов, входящих в модули *MATLAB*, устанавливались по умолчанию. Условием окончания поиска было отсутствие изменений минимизируемой функции, превышающих порог DGF_{\min} , значение которого является одной из настроек и, как указано выше, принималось равным значению по умолчанию. Для алгоритма CS были заданы размер популяции $N_{pop} = 20$ и число поколений $maxgenN = 400$. Поиск заканчивался после отработки всех поколений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты экспериментов с ЦФ $f_1(\mathbf{x})$ приведены в табл. 1, где даны минимальные и максимальные значения найденных решений по 100 циклам поиска

¹ <http://www.mathworks.com>, дата обращения 14.12.2021. <http://www.mathworks.com>. Accessed December 14, 2021.]

Таблица 1. Результаты экспериментов с ЦФ $f_1(\mathbf{x})$

Алгоритм	$ND = 2, \min(f_1) = -1.414$			$ND = 4, \min(f_1) = -2.000$			$ND = 8, \min(f_1) = -2.828$		
	$\min(f_1)$	$\max(f_1)$	<i>Neval</i>	$\min(f_1)$	$\max(f_1)$	<i>Neval</i>	$\min(f_1)$	$\max(f_1)$	<i>Neval</i>
SS	-1.414	-1.017	84844	-2.000	-1.396	320100	-2.717	-2.327	1280948
PS	-1.414	-1.126	14503	-1.998	-1.540	30330	-2.780	-1.833	70876
MS	-1.414	-1.052	23623	-2.000	0.053	60650	-2.806	1.010	147627
SA	-1.414	-1.386	192039	-1.998	-1.873	381223	-2.782	-2.340	752386
GA	-1.414	-1.372	631387	-2.000	-1.946	1456566	-2.827	-2.821	5748740
PSO	-1.414	-1.412	187060	-2.000	-1.996	541760	-2.828	-2.821	1508800
CS	-1.414	-1.413	1677900	-2.000	-1.984	1677900	-2.825	-2.793	1677900
MC1	-1.414	-0.756	29340	-1.999	-0.542	72418	-2.828	-0.440	100494
MC2	-1.414	-1.414	3465	-2.000	-2.000	7201	-2.828	-2.828	16211

для размерностей $ND = 2, 4$ и 8 . В третьих столбцах приведены количества *Neval* вычислений ЦФ в процессе поиска. В верхней строке даны точные значения глобального минимума, найденные аналитически.

Дополнительную информацию о работе алгоритмов дают карты положений стартовых точек циклов поиска, соединенных отрезками прямых с соответствующими конечными точками, примеры которых даны на рис. 2. Для популяционных алгоритмов, в частности для PSO, показаны только положения найденных оптимальных решений, т.к. каждый агент в популяции имеет свое стартовое положение.

Непопуляционные алгоритмы SS, PS, MS, MC1 движутся по направлению к точке минимума, пока не достигнут «стены». Их результаты по циклам поиска имеют значительный разброс. Существенно лучшими оказываются популяционные алгоритмы PSO и CS. Большинство найденных ими решений находятся в ближайшей окрестности глобального минимума, поэтому для получения хорошего результата не нужно много повторений поиска. Лучшие результаты показал алгоритм MC2. Это объяснимо, т.к. $f_1(\mathbf{x})$ не имеет локальных минимумов. При этом как минимизируемый, так и ограничиваемый ПК

описываются дважды дифференцируемыми функциями. В таких условиях алгоритм SQP быстро и точно находит оптимальное решение в каждом запуске для всех размерностей пространства поиска.

Результаты экспериментов с ЦФ $f_2(\mathbf{x})$ приведены в табл. 2. Предположительные значения глобального минимума в верхней строке получены путем дополнительного поиска в ограниченных окрестностях лучших из найденных решений. Примеры карт положений стартовых и конечных точек поиска приведены на рис. 3. Примеры гистограмм значений найденных оптимальных решений для случая $ND = 8$ показаны на рис. 4.

Алгоритмы SS, MS и MC1 заканчивают поиски в ближайшем к стартовой точке локальном минимуме (рис. 3). Для попадания в глобальный или хотя бы близкий к нему минимум необходимо выполнить значительное количество циклов поиска. В то же время алгоритмы SA, GA, PSO и CS все циклы поиска заканчивают или в глобальном минимуме, или в двух ближайших к нему локальных. Это и следовало ожидать, т.к. эти алгоритмы предназначены именно для глобальной оптимизации.

При размерности $ND = 8$ точное значение глобального минимума находит только алгоритм PSO.

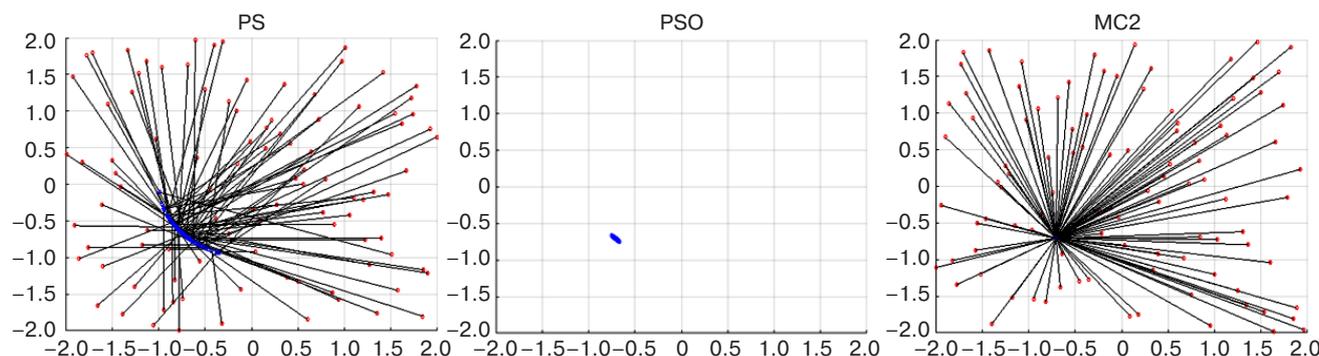


Рис. 2. Стартовые точки поиска и положения решений (синие) для $f_1(\mathbf{x})$ при $ND = 2$

Таблица 2. Результаты экспериментов с ЦФ $f_2(\mathbf{x})$

Алгоритм	$ND = 2, \min(f_2) = -2.000$			$ND = 4, \min(f_2) = -2.040$			$ND = 8, \min(f_2) = -2.097$		
	$\min(f_2)$	$\max(f_2)$	<i>Neval</i>	$\min(f_2)$	$\max(f_2)$	<i>Neval</i>	$\min(f_2)$	$\max(f_2)$	<i>Neval</i>
SS	-2.000	560.2	24313	-2.016	1036.3	94421	86.4	1892.6	376213
PS	-1.999	-0.475	15173	-2.034	-0.545	34606	-1.559	-0.690	87668
MS	-2.000	564.0	10383	-1.998	1042.0	20267	-2.082	1896.4	88995
SA	-2.000	-0.924	190021	-2.039	1.765	455552	-2.089	372.8	819478
GA	-2.000	-1.269	535649	-2.040	-0.633	1400355	-1.593	-0.895	6594051
PSO	-2.000	-1.277	208501	-2.040	-0.647	593081	-2.097	0.304	1603361
CS	-2.000	-1.279	31960	-2.040	-1.404	31960	-2.091	-1.566	31960
MC1	-1.998	278.1	15445	-2.036	942.1	20946	-0.609	1608.6	36057
MC2	-2.848	1.897	130078	-5.696	5.696	329294	-11.386	5.701	577958

Но, как видно из гистограммы на рис. 4, это значение найдено один раз из ста попыток. В то же время алгоритм CS многократно заканчивал поиск вблизи глобального минимума, а в остальных случаях попадал в локальные минимумы, ближайšie к глобальному.

Обратим внимание на результаты алгоритма MC2. Среди них много значений, существенно меньших, чем глобальный минимум $f_2(\mathbf{x})$ (рис. 4). Проверка показывает, что в этих решениях нарушены ограничения на фиксируемый ПК. Таким образом, алгоритм MC2 оказался непригодным для оптимизации данной функции, хотя в окрестностях любого из ее локальных минимумов оба ПК описываются дважды дифференцируемыми функциями.

Перейдем к результатам оптимизации ЦФ $f_3(\mathbf{x})$ (6) и $f_4(\mathbf{x})$ (7). Данные задачи относятся к задачам Black Box Optimization, для которых ни точные решения, ни какая-либо информация о свойствах ЦФ до начала поиска не известны. Лучшие решения для каждого алгоритма приведены в табл. 3 и 4 соответственно. Курсивом отмечены существенные нарушения ограничений на ПК. Жирным шрифтом выделены лучшие результаты. Примеры гистограмм значений ЦФ для найденных решений показаны на рис. 5 и рис. 6. Для алгоритма MC2 шкала горизонтальной

оси содержит значения минимизируемого ПК, а не скалярной ЦФ.

Задача оптимизации $f_3(\mathbf{x})$ заключалась в минимизации ПК DTd при ограничениях $DHp \leq 0.5$ дБ, $Hs \geq 40$ дБ, $DHt \leq 0$. Эти ограничения выполнены всеми алгоритмами, кроме CS. При этом минимальное значение DTd найдено методом MC2, который также превзошел другие алгоритмы по количеству решений, совпадающих с лучшим (рис. 5). Но в то же время среди результатов поиска данным методом есть несколько решений, в которых нарушены ограничения. За счет этого ПК DTd оказался меньше правильного оптимального значения.

Задача оптимизации $f_4(\mathbf{x})$ состояла в минимизации ПК Tss при выполнении ограничений $Hs \geq 40$ дБ, $DHt \leq 0$, $Tfr \leq 0.5$, $Um_i \leq 1.1$. С приемлемой точностью ограничения выполнены только популяционными алгоритмами GA и PSO (табл. 4), лучшие результаты поиска минимума Tss у которых одинаковы. По статистике результатов эти два алгоритма также эквивалентны (рис. 6), а по требуемому объему вычислительных операций алгоритм PSO оказался заметно лучше GA. Отметим, что алгоритм MC2 для решения данной задачи оказался совсем непригодным.

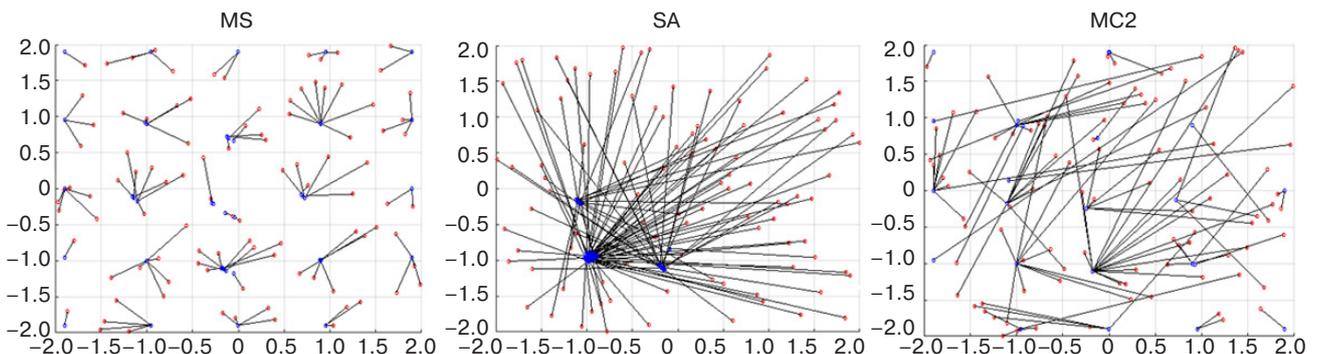


Рис. 3. Стартовые точки поиска и положения решений (синие) для $f_2(\mathbf{x})$ при $ND = 2$

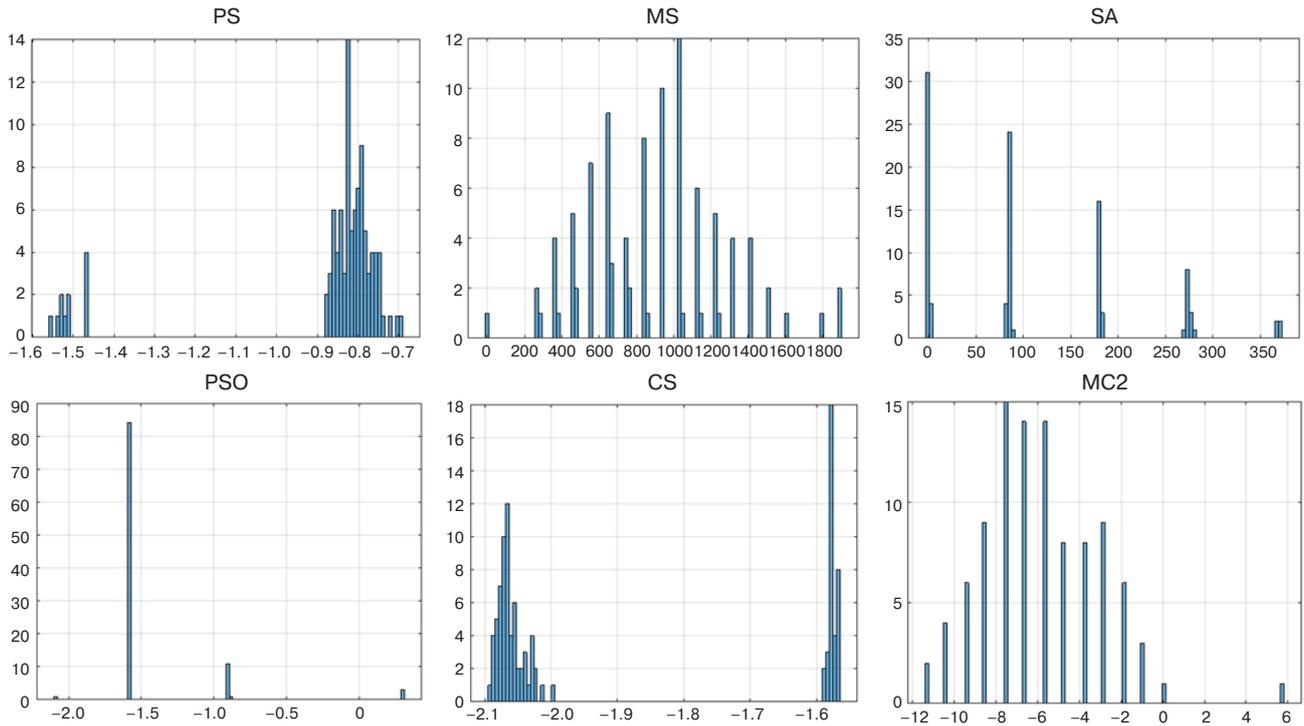


Рис. 4. Гистограммы значений найденных решений для $f_2(\mathbf{x})$ при $ND = 8$

Таблица 3. Результаты экспериментов с ЦФ $f_3(\mathbf{x})$

Алгоритм	$\min(GF)$	DH_p , дБ	H_s , дБ	DH_t	$DTd\%$	$Neval$
SS	5.070	0.500	40.040	0.000	60.699	332488
PS	5.615	0.510	40.000	0.000	62.103	46699
MS	6.708	0.500	40.000	0.000	77.084	33887
SA	2.552	0.500	40.009	0.000	35.515	280390
GA	2.253	0.500	40.881	0.000	32.530	3009450
PSO	2.127	0.500	40.000	0.000	31.266	1211160
CS	62.124	1.752	39.559	0.000	75.268	1278400
MC1	2.913	0.500	40.533	0.000	39.128	40771
MC2	31.126	0.500	40.000	0.000	31.126	39828

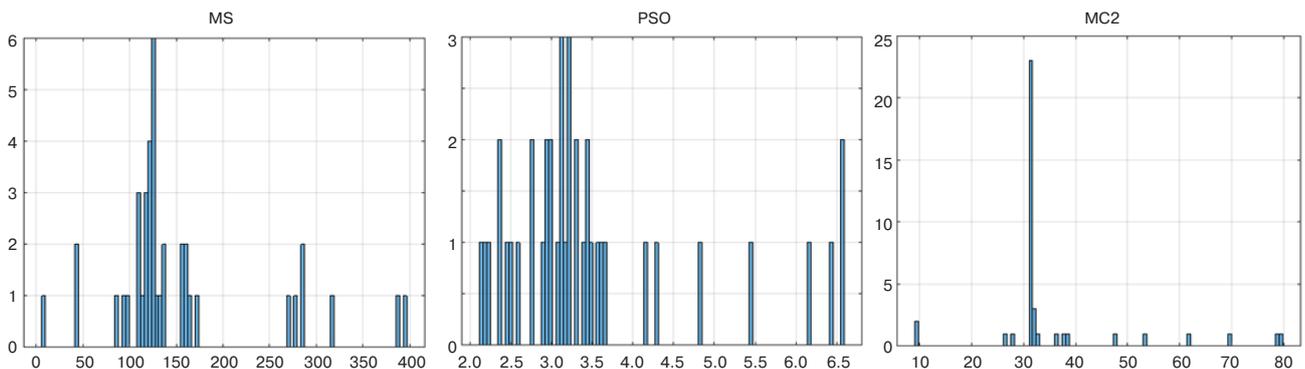
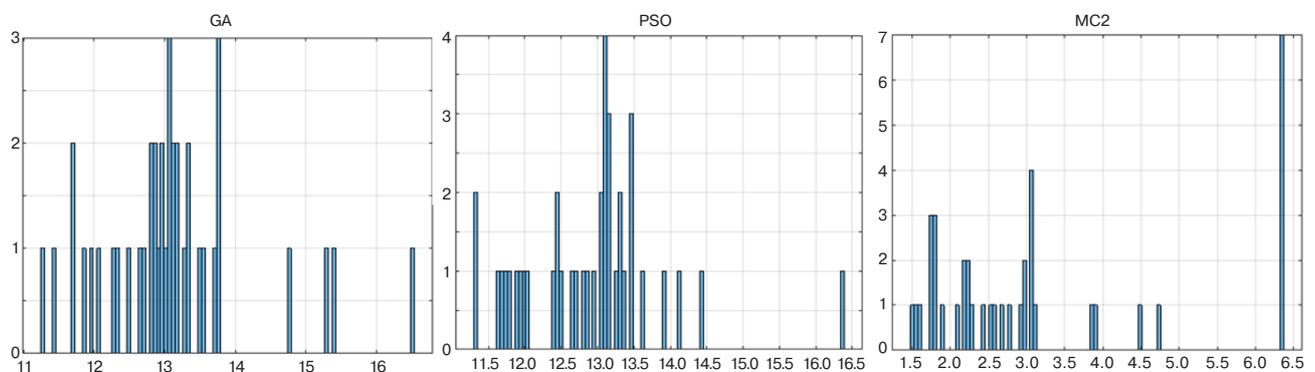


Рис. 5. Гистограммы значений найденных решений для $f_3(\mathbf{x})$

Таблица 4. Результаты экспериментов с ЦФ $f_4(\mathbf{x})$

Алгоритм	$\min(GF)$	H_s , дБ	DHt	T_{fr}	T_{ss}	U_m	$Neval$
SS	38.283	33.821	0.000	0.528	1.681	1.235	75904
PS	11.888	40.247	0.000	0.500	1.273	1.116	41477
MS	16.378	40.000	0.000	0.500	1.569	1.269	30440
SA	12.747	40.003	0.000	0.500	1.324	1.151	227064
GA	11.287	40.001	0.000	0.500	1.229	1.100	1512630
PSO	11.301	40.000	0.000	0.500	1.229	1.101	548280
CS	20.796	35.942	0.000	0.500	1.165	1.080	1278400
MC1	33.355	40.267	0.000	0.551	2.391	1.132	15107
MC2	1.480	43.663	0.000	1.044	1.480	1.006	19902

Рис. 6. Гистограммы значений найденных решений для $f_4(\mathbf{x})$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что поиск Парето-оптимальных решений путем решения задачи (1) может осуществляться разными методами, выбирать из которых следует в зависимости от свойств функций, входящих в (1). Из рассмотренных алгоритмов лучшие решения для всех функций нашел только эвристический алгоритм PSO. Поэтому его можно рекомендовать как основной метод для решения задач типа (1).

Для функций $f_1(\mathbf{x})$ и $f_3(\mathbf{x})$ применимым оказался алгоритм MC2, относящийся к методам нелинейного программирования. Для указанных функций данный метод находит оптимальное решение в большинстве циклов поиска и требует для поиска значительно меньшего объема вычислений, чем эвристические алгоритмы, оптимизирующие скалярную ЦФ (2). Однако для функций $f_2(\mathbf{x})$ и $f_4(\mathbf{x})$ алгоритм MC2 оказался непригодным. В случае функции $f_2(\mathbf{x})$ это можно объяснить ее мультимодальностью. В случае функции $f_4(\mathbf{x})$ объяснение пока отсутствует, т.к. о свойствах функций, входящих в соотношения (7), ничего сказать нельзя.

Один из путей оценки применимости методов нелинейного программирования типа MC2 для

решения задачи (1) состоит в предварительном исследовании свойств функций, определяющих значения входящих в (1) ПК. Но и на этом пути возникают проблемы. Например, как проверить мультимодальность ЦФ? Обычно применяемый подход основан на многократном поиске локальных экстремумов из равномерно распределенных стартовых точек. При этом рекомендуется применять алгоритм Нелдера – Мида (выше обозначен MS) [7]. Однако при наличии в рельефе ЦФ «оврагов» – областей, в которых скорость изменения функции по одному направлению значительно меньше, чем по другим, алгоритмы локального поиска будут останавливаться в различных точках дна «оврага», которые не являются локальными минимумами [10]. Методы обнаружения в рельефе ЦФ «стен», «оврагов», «плато» и поиска экстремумов при наличии таких участков пока мало разработаны.

Таким образом, вопрос оценки применимости алгоритмов нелинейного программирования типа MC2 для решения задачи (1) требует дополнительных исследований. Пока же можно предложить следующий порядок действий. Сначала выполнить некоторое количество циклов поиска решения задачи (1) методом MC2. Если большинство решений оказываются близким друг к другу и в них не нарушаются

ограничения, то лучшее из этих решений можно принять за искомый оптимум. Если же решения имеют значительный разброс и в большинстве из них

ограничения нарушены, то следует перейти к оптимизации скалярной ЦФ (2) с помощью алгоритма PSO.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпенко А.П. *Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой*. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2021. 448 с. ISBN 978-5-7038-5563-8
2. Arora J.S. *Introduction to Optimum Design*. 4th edition. Elsevier; 2017. 945 p.
3. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. *Практическая оптимизация*: пер. с англ. М.: Мир; 1985. 509 с.
4. Никул А.С. *Оптимизация целевых функций. Аналитика. Численные методы. Планирование эксперимента*. М.: Изд-во Физико-математической литературы; 2009. 336 с.
5. Jamil M., Yang X. A literature survey of benchmark functions for global optimization problems. *Int. Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimization*. 2013;4(2):150–194. <http://doi.org/10.1504/IJMMNO.2013.055204>
6. Liu S., Lin Q., Tan K.Ch., Li Q. *Benchmark problems for CEC2021 competition on evolutionary transfer multiobjective optimization*. Technical report. 2021. URL: <https://arxiv.org/pdf/2110.08033v1>
7. Mersmann O., Bischl B., Trautmann H., Preuss M., Weihs C., Rudolf G. Exploratory landscape analysis. In: *GECCO'11, 2011: Proceedings 13th Annual Genetic and Evolutionary Computation Conference*. 2011. P. 829–836. <https://doi.org/10.1145/2001576.2001690>
8. Trajanov R., Dimeski S., Popovski M., Korosec P., Eftimov T. *Explainable landscape-aware optimization performance prediction*. Preprint. October 22, 2021. URL: <https://arxiv.org/pdf/2110.11633v1>
9. Гуткин Л.С. *Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества*. М.: Советское радио; 1975. 368 с.
10. Черноруцкий И.Г. *Методы оптимизации в теории управления*. СПб.: Питер; 2004. 256 с.
11. Смирнов А.В. Метод одновременной оптимизации характеристик электрических фильтров в частотной и временной областях. *Российский технологический журнал*. 2018;6(6):13–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-13-27>
12. Смирнов А.В. Оптимизация характеристик цифровых фильтров одновременно в частотной и временной областях. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):63–77. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-63-77>
13. Смирнов А.В. Применение популяционных алгоритмов в задачах многокритериальной оптимизации характеристик электрических фильтров. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(3):29. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.34.3.015>

REFERENCES

1. Karpenko A.P. *Sovremennye algoritmy poiskovoi optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennye prirodoi (Modern Search Optimization Algorithms. Nature-Inspired Optimization Algorithms)*. Moscow: Baumanpress; 2021. 448 p. (in Russ). ISBN 978-5-7038-5563-8
2. Arora J.S. *Introduction to Optimum Design*. 4th edition. Elsevier; 2017. 945 p.
3. Gill Ph.E., Murray W., Wright M.H. *Practical Optimization*. London: Academic Press; 1981. 402 p. [Gill F., Myurrei U., Rait M. *Prakticheskaya optimizatsiya (Practical Optimization)*: transl. from Engl. Moscow: Mir; 1985. 509 p. (in Russ.).]
4. Ninul A.S. *Optimizatsiya tselevykh funktsii. Analitika. Chislennye metody. Planirovanie eksperimenta (Optimization of Objective Functions. Analytics. Numerical Methods. Design of Experiments)*. Moscow: Fizmatizdat; 2009. 336 p. (in Russ.).
5. Jamil M., Yang X. A literature survey of benchmark functions for global optimization problems. *Int. Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimization*. 2013;4(2):150–194. <http://doi.org/10.1504/IJMMNO.2013.055204>
6. Liu S., Lin Q., Tan K.Ch., Li Q. *Benchmark problems for CEC2021 competition on evolutionary transfer multiobjective optimization*. Technical report. 2021. Available from URL: <https://arxiv.org/pdf/2110.08033v1>
7. Mersmann O., Bischl B., Trautmann H., Preuss M., Weihs C., Rudolf G. Exploratory Landscape Analysis. In: *GECCO'11, 2011: Proceedings 13th Annual Genetic and Evolutionary Computation Conference*. 2011. P. 829–836. <https://doi.org/10.1145/2001576.2001690>
8. Trajanov R., Dimeski S., Popovski M., Korosec P., Eftimov T. *Explainable landscape-aware optimization performance prediction*. Preprint. October 22, 2021. Available from URL: <https://arxiv.org/pdf/2110.11633v1>
9. Gutkin L.S. *Optimizatsiya radioelektronnykh ustroystv po sovokupnosti pokazatelei kachestva (Optimization of Radio Electronic Devices with Aggregation of Quality Indexes)*. Moscow: Sovetskoe Radio; 1975. 368 p. (in Russ).
10. Chernorutskii I.G. *Metody optimizatsii v teorii upravleniya (Optimization Methods in Control Theory)*. St. Petersburg: Piter; 2004. 256 p. (in Russ).
11. Smirnov A.V. Method of simultaneous optimization of radio devices performance in frequency and time domains. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2018;6(6): 13–27 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-13-27>

14. Смирнов А.В. *Многокритериальная оптимизация характеристик радиотехнических устройств с применением технологий искусственного интеллекта*. М.: МИРЭА – Российский технологический университет; 2020. 140 с.
15. Lindfeld G., Penny J. *Introduction to Nature-Inspired Optimization*. Academic Press; 2017. 256 p.
12. Smirnov A.V. Optimization of digital filters performances simultaneously in frequency and time domains. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(6):63–77 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-63-77>
13. Smirnov A.V. Application of population algorithms in the problems of multiobjective optimization of electrical filters characteristics. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology (MOIT)*. 2021;9(3):29 (in Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.34.3.015>
14. Smirnov A.V. *Mnogokriterial'naya optimizatsiya kharakteristik radiotekhnicheskikh ustroystv s primeneniem tekhnologii iskusstvennogo intellekta (Multi-objective optimization of radio engineering devices parameters using of artificial intellect technologies)*. Moscow: MIREA; 2020. 140 p. (in Russ.).
15. Lindfeld G., Penny J. *Introduction to Nature-Inspired Optimization*. Academic Press; 2017. 256 p.

Об авторе

Смирнов Александр Витальевич, к.т.н., доцент, профессор кафедры телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информатики систем 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>

Мировоззренческие основы технологии и общества
Philosophical foundations of technology and society

УДК 378

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-86-92>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Применение подхода воспроизводимых исследований в процессе дистанционного обучения

М.А. Еремеев,
О.В. Трубиенко[@],
И.И. Захарчук

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Изменение характера решения задач в сфере информационных технологий, связанное с глобализацией экономики, возможностями удаленной работы, а также глобальными угрозами пандемии COVID-19, накладывает новые требования к компетенциям и навыкам будущих специалистов, что, в свою очередь, требует внесения корректив и в процесс подготовки специалистов в высших учебных заведениях. В настоящее время широко известны различные методологии проектного управления Agile и Scrum (часто еще называемые «методологиями гибкой разработки»), подходы в управлении информационно-телекоммуникационной инфраструктурой Infrastructure-as-Code, а также подходы в разработке документации Documentation-as-Code. Их общая цель – представить процесс проектирования, разработки, тестирования и документирования в итеративном виде с короткими периодами цикла, позволяющего прозрачно добавлять новую ценность продукта небольшими порциями. В области образования этой ценностью являются новые знания, умения и практические навыки обучающихся, которые можно легко и прозрачно измерить в процессе освоения ими дисциплины. Цель исследования – разработать способы применения современных методик разработки программного обеспечения в процессе обучения студентов технических специальностей.

Методы. Использовались методы воспроизводимых исследований (reproducible research) и практик гибкого проектирования при организации и руководстве выполнением обучающимися практических работ.

Результаты. Представлен подход к использованию современных инструментов, применяемых при разработке программного обеспечения на базе онлайн-сервисов git-хостинга (GitLab и GitHub), а также парадигмы «воспроизводимых исследований» в процессе дистанционного обучения с использованием формата R Markdown компании RStudio.

Вывод. Применение предложенного подхода позволяет, помимо увеличения вовлеченности обучающихся в процесс выполнения практических заданий, снизить нагрузку на преподавателя по проверке и оцениванию результатов работы студентов.

Ключевые слова: воспроизводимые исследования, R Markdown в обучении, Git в обучении, Agile в обучении

• Поступила: 09.11.2021 • Доработана: 15.05.2022 • Принята к опубликованию: 27.06.2022

Для цитирования: Еремеев М.А., Трубиенко О.В., Захарчук И.И. Применение подхода воспроизводимых исследований в процессе дистанционного обучения. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):86–92. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-86-92>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Applying a reproducible research approach to distance education

Michail A. Eremeev,
Oleg V. Trubienko[@],
Ivan I. Zakharchuk

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

Abstract

Objectives. Emerging as a response to the global threats presented by the COVID-19 pandemic, the changing nature of problem-solving in the field of information technology associated with economic globalization, including possibilities of remote working, imposes new requirements on the competencies and skills of future professionals. This, in turn, requires adjustments to the higher education process. Agile project management methodologies such as Scrum, along with Infrastructure-as-Code approaches in information and telecommunication infrastructure management, and Documentation-as-Code approaches in documentation development, aim to present design, development, testing, and documentation as short cycle iterative processes to permit the rapid and transparent addition of new product value in discrete portions. Applied to the education sphere, this approach implies new knowledge and practical skills of students that can be easily and transparently measured in the process of mastering a discipline. The present paper aims to develop methods of applying modern software development techniques to training students of technical specialties.

Methods. The use of reproducible research methods and agile design practices while organizing and managing practical tasks for students is proposed.

Results. Contemporary tools used in software development based on Git hosting services (GitLab and GitHub) are presented alongside reproducible research paradigms in distance education using the R Markdown format by RStudio.

Conclusions. In addition to increasing the involvement of students in the process of practical tasks, the proposed approach can be used to reduce the workload of teachers when checking and evaluating student working results.

Keywords: reproducible research, R Markdown in education, Git in education, Agile in education

• Submitted: 09.11.2021 • Revised: 15.05.2022 • Accepted: 27.06.2022

For citation: Eremeev M.A., Trubienko O.V., Zakharchuk I.I. Applying a reproducible research approach to distance education. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):86–92. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-86-92>

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

Развитие информационных технологий меняет традиционные подходы к решению различных задач и проблем, возникающих в процессе жизнедеятельности человека. Внезапное увеличение рисков для человечества, связанных с пандемией COVID-19, вынуждает искать новые средства увеличения эффективности деятельности, в т.ч. и в образовательной сфере. Техническая возможность обеспечения взаимодействия преподавателя и обучающихся дистанционно по каналам связи, помимо удобства и гибкости управления процессом обучения, в настоящее время имеет принципиально новое значение.

Трендом развития и рационализации современного образования на основе использования электронных и мобильных средств обучения является так называемое совместное обучение – самостоятельная работа обучающихся во взаимодействии с другими обучающимися при участии преподавателя [1, 2]. Переход российской системы образования к компетентностному подходу предполагает создание условий для овладения обучающимися набором компетенций, определяющих готовность выпускника к устойчивой профессиональной деятельности [3–6]. Идея применения технологий, используемых при разработке программного обеспечения, в других сферах не нова. В настоящее время широко известны различные методики проектного управления Agile¹ и Scrum² (часто еще называемые «методологиями гибкой разработки»), подходы в управлении информационно-телекоммуникационной инфраструктурой Infrastructure-as-Code³, а также подходы в разработке документации Documentation-as-Code⁴. Применение апробированных инструментов таких, как система управления версиями Git⁵; языки разметки

Wiki⁶, Markdown⁷; системы управления задачами (task management systems) Jira⁸, Asana⁹, Trello¹⁰ позволяет:

- 1) создать единое хранилище общего интеллектуального продукта и обеспечить одновременный доступ всех участников процесса его создания;
- 2) обеспечить возможность параллельной работы над конкурирующими вариантами решения одной проблемы и экспериментами с возможностью «отката» к любому первоначальному состоянию;
- 3) при приеме решений использовать знания и опыт всех членов команды, а не только тех, кто прямо задействован в проекте;
- 4) фиксировать принятые решения для последующего ретроспективного анализа с целью выработки лучших практик в данной области и их распространения;
- 5) обеспечить асинхронность взаимодействия участников;
- 6) обеспечить возможность более объективной оценки вклада каждого из участников в результат.

В данной статье обобщен опыт проведения практических и лабораторных работ с помощью технологий интерактивных электронных отчетов R Markdown [7], а также системы версионирования Git. Основная цель работы – разработка такой образовательной технологии, которая, с одной стороны, позволила бы привить навыки использования современных инструментов, обеспечивающих организацию индивидуальной, независимой траектории обучения для каждого, с другой стороны – продемонстрировать необходимость и возможность коллективной работы в едином информационном пространстве. При этом показать возможность совмещения этих, казалось бы, противоречивых стремлений, а также исключить использование специализированных образовательных программных продуктов и сосредоточиться исключительно на продуктах, применяемых в ИТ-отрасли. Это позволило бы привить, с одной стороны, инженерные навыки выстраивания новых информационных архитектур, а с другой – исключить у обучающихся иллюзию «игрушечности»

¹ <https://www.atlassian.com/ru/agile/manifesto>, дата обращения 23.05.2021. [<https://www.atlassian.com/ru/agile/manifesto>. Accessed May 23, 2021 (in Russ.).]

² <https://www.scrum.org/>, дата обращения 23.05.2021. [<https://www.scrum.org/>. Accessed May 23, 2021.]

³ <https://docs.microsoft.com/en-us/devops/deliver/what-is-infrastructure-as-code>, дата обращения 23.05.2021. [<https://docs.microsoft.com/en-us/devops/deliver/what-is-infrastructure-as-code>. Accessed May 23, 2021.]

⁴ <https://openpracticelibrary.com/practice/docs-as-code/#:~:text=What%20Is%20Docs%20As%20Code,you%20can%20expect%20to%20see.&text=A%20culture%20of%20adaptation%20and,%2C%20and%20processes%2C%20over%20time>, дата обращения 23.05.2021. [<https://openpracticelibrary.com/practice/docs-as-code/#:~:text=What%20Is%20Docs%20As%20Code,you%20can%20expect%20to%20see.&text=A%20culture%20of%20adaptation%20and,%2C%20and%20processes%2C%20over%20time>. Accessed May 23, 2021.]

⁵ <https://git-scm.com/>, дата обращения 23.05.2021. [<https://git-scm.com/>. Accessed May 23, 2021.]

⁶ <http://www.xwiki.org/xwiki/bin/view/Main/>, дата обращения 23.05.2021. [<http://www.xwiki.org/xwiki/bin/view/Main/>. Accessed May 23, 2021.]

⁷ <https://daringfireball.net/projects/markdown/>, дата обращения 23.05.2021. [<https://daringfireball.net/projects/markdown/>. Accessed May 23, 2021.]

⁸ <https://www.atlassian.com/software/jira#>, дата обращения 23.05.2021. [<https://www.atlassian.com/software/jira#>. Accessed May 23, 2021.]

⁹ <https://asana.com/>, дата обращения 23.05.2021. [<https://asana.com/>. Accessed May 23, 2021 (in Russ.).]

¹⁰ <https://trello.com/>, дата обращения 23.05.2021. [<https://trello.com/>. Accessed May 23, 2021.]

и «искусственности» выполняемых работ, повысить их заинтересованность и активность. В итоге использование таких технологий, помимо повышения качества обучения должно увеличить привлекательность учебного заведения для абитуриентов [8].

Вопросы организации дистанционной работы и обучения в настоящее время актуальны как никогда прежде. Основное внимание уделяется технологиям телеконференций (Zoom¹¹, Microsoft Teams¹², Cisco Webex¹³), при этом структура взаимодействия преподавателя и обучающихся остается традиционной. Предлагаемый в данной работе подход, помимо традиционного взаимодействия «преподаватель-обучающийся», ориентирован на активное взаимодействие учащихся между собой за счет введения механизмов геймификации и соревновательности.

Особо стоит отметить свойство асинхронности взаимодействия в процессе обучения: оно позволяет всем участникам процесса гибко управлять своим индивидуальным временным ресурсом, в т.ч. обеспечивая взаимодействие из различных точек мира, независимо от часового пояса. Асинхронность взаимодействия снимает формальные ограничения в виде установленной продолжительности занятий с обучающимися в вузе, оставляя лишь контрольные точки синхронизации (сроки сдачи отчетности), которые стимулируют обучающихся к самостоятельному планированию и организации работы.

ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕРАКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ОТЧЕТОВ R MARKDOWN

Современные научные исследования – это продукт деятельности целых коллективов, где новые знания появляются в результате работы длинных цепочек более мелких исследований, базирующихся на результатах друг друга. Поэтому цена ошибки, допущенной на любом из ее этапов, часто слишком высока. Проблема воспроизводимости научных исследований стоит очень остро как в естественно-научных и технических, так и в гуманитарных науках.

Под воспроизводимостью научных исследований понимается возможность повторения эксперимента, вычислений, моделирования на тех же исходных данных, что и в первоначальном эксперименте, с получением аналогичного результата. Для этого все исходные данные должны быть открытыми для публичного изучения, а использованные методы и

средства – достаточно подробно и полно документированы¹⁴ [9]. В случае, если используются методы моделирования, должен быть представлен исходный код используемых программных средств. Одним из вариантов реализации указанных требований является технология R Markdown [10, 11].

R Markdown – это синтаксис языка разметки и технология обработки специально сформированных документов, включающих в себя как авторский текст, формулы, так и программный код, результаты работы которого автоматически вставляются в генерируемый отчет. Результатами выполнения такого кода могут быть таблицы, графики, схемы, диаграммы, географические карты, тепловые карты и т.д.

Преимуществом этого подхода является автоматизация генерации отчета или статьи и минимизация вероятности внедрения ошибок при переносе результатов в отчет. Помимо этого, поскольку программный код содержится в самом отчете, существует возможность проверки и многократного воспроизведения проведенных вычислений другими специалистами. Более того, облегчается повторное использование проведенных вычислений в других работах за счет возможности применения уже написанного программного кода, а также повторное использование разработанных алгоритмов и методик в других сферах.

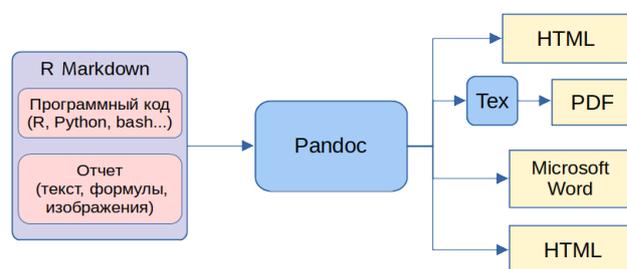


Рисунок. Схема формирования итогового документа

Отчет может быть сгенерирован в виде файла Microsoft Word, презентации Microsoft PowerPoint или Reveal.js, в формате издательской системы Tex, в формате pdf, в виде интерактивного веб-приложения (см. рисунок).

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ВЕРСИЙ GIT

Git создавался как распределенная система контроля версий исходного кода программного обеспечения. Созданный в 2005 г. основоположником операционной системы Linux Линусом Торвальдсом

¹¹ <https://zoom.us/>, дата обращения 23.05.2021. [<https://zoom.us/>. Accessed May 23, 2021.]

¹² <https://www.microsoft.com/ru-ru/microsoft-teams/group-chat-software>, дата обращения 23.05.2021. [<https://www.microsoft.com/ru-ru/microsoft-teams/group-chat-software>. Accessed May 23, 2021 (in Russ.).]

¹³ <https://www.webex.com/>, дата обращения 23.05.2021. [<https://www.webex.com/>. Accessed May 23, 2021.]

¹⁴ Зайцев В.С. *Современные педагогические технологии: учебное пособие*. В 2-х кн. Челябинск: ЧГПУ; 2012. 411 с. [Zaitsev V.S. *Modern pedagogical technologies: textbook*. In 2 books. Chelyabinsk: ChSPU; 2012. 411 p. (in Russ.).]

как замена аналогичному ПО с закрытым исходным кодом, Git быстро завоевал популярность благодаря распределенности структуры управления версиями, простоте архитектуры. Среди основных достоинств Git также можно упомянуть:

- 1) поддержку нелинейного процесса написания исходного кода программного продукта с возможностью ветвления, параллельной работой над каждой веткой, слияния;
- 2) использование существующих широко распространенных протоколов (SSH, FTP, HTTPS) для обеспечения каналов связи между репозиториями;
- 3) высокую скорость работы;
- 4) криптографическое обеспечение целостности истории изменений.

В системе Git история изменений исходного кода состоит из последовательной цепочки «контрольных точек» (коммитов). В случае с параллельной работой над разными версиями кода такая цепочка «разветвляется», а при слиянии изменений – сходится.

В настоящее время существует множество онлайн-хостингов исходного кода, наиболее известные из которых – GitHub.com и GitLab.com. Они представляют собой веб-приложения, позволяющие не только настраивать репозитории кода Git, но и выполнять широкий спектр задач по проектированию, написанию кода, тестированию, документированию, сборке и доставке программных продуктов.

ОРГАНИЗАЦИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ R MARKDOWN И GIT

Совмещение указанных технологий преследует следующие основные цели:

- 1) освоение учащимися навыков работы в команде и взаимодействия на всех этапах выполнения проекта – от планирования до написания отчета;
- 2) знакомство с современными технологиями и инструментами аналитической деятельности и программной разработки [12];
- 3) повышение мотивации обучающихся к качественному выполнению заданий за счет заинтересованности в возможном повторном использовании наработок, в т.ч. в других дисциплинах [13];
- 4) контроль хронологии выполнения поставленных заданий и оценка вклада каждого участника;
- 5) облегчение проверки корректности представленных вычислений и исключение «подгонки» данных под желаемый результат, что стимулирует обучающихся к более глубокому и детальному изучению темы [14].

В ходе учебных занятий обучающиеся разбиваются на команды (расчеты) численностью 4–6 человек.

Каждая группа создает свой центральный репозиторий (используя сервисы GitHub или GitLab), в котором участники организуют работу над заданием или проектом. В репозиторий добавляются шаблон отчета и исходные данные. Члены команды по своему усмотрению могут добавлять любые материалы, относящиеся к выполнению поставленного задания: справки, ссылки на литературу и интернет-ресурсы, схемы и т.д. Репозиторий становится логической центральной точкой взаимодействия обучающихся. В ходе этого приобретаются и укрепляются навыки удаленного взаимодействия с использованием современных информационных технологий.

По результатам работы каждой команды оформляются R Markdown-отчет в формате Rmd и его выходное отображение в формате html или pdf. Основное требование к полученному отчету – его воспроизводимость, то есть возможность скомпилировать на компьютере преподавателя идентичный отчетный документ по входным данным. В ходе этого производится автоматическая проверка корректности применяемых учащимися методов и средств. По коммитам (контрольным точкам) в групповом репозитории преподаватель имеет возможность оценить продуктивность каждого участника группы и его вклад в конечный продукт. Каждый участник должен участвовать в работе над заданием и написании отчета – сделать хотя бы один значимый коммит. Данное обстоятельство подстегивает участников включаться в работу как можно раньше, выполняя наиболее очевидную работу над заданием. И наоборот, низкая активность в ходе выполнения работы вынуждает дополнять и улучшать уже выложенные результаты работы: комментировать и оформлять программный код, изучать и описывать альтернативные варианты выполнения задачи, улучшать оформление графиков, т.е. выполнять работу, требующую более детальной проработки и углубленного изучения материала.

Среди преимуществ данного подхода в обучении можно отдельно отметить асинхронность взаимодействия преподавателя с учащимися и учащихся между собой. Это позволяет индивидуально для каждого обучающегося организовывать и планировать время обучения, при этом сохраняется интерактивность процесса и чувство вовлеченности в общую работу. Таким образом, выстраивается *индивидуальный образовательный трек* при сохранении основных «реперных точек» рабочих программ дисциплин.

Также, в качестве преимущества, можно выделить совмещение средств организации распределенной работы со средствами документирования и «упаковывания» знаний во воспроизводимый формат, что повышает эффективность усвоения материала и овладения компетенциями при сохранении гибкости в тайм-менеджменте обучающихся.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате организации практических и лабораторных работ в соответствии с предложенным подходом удалось добиться ряда преимуществ по сравнению с традиционным подходом деления на команды. Во-первых, повышается общая активность обучающихся, появляется интерес к использованию современных средств менеджмента, тайм-трекинга, управления документацией и программным кодом. Во-вторых, в результате работы появляется воспроизводимый результат, который исключает возможность подтасовки решения под необходимый результат или поиск уже готового решения – все этапы поиска и прохождения решения все равно придется выполнять, увеличивается общее доверие к системе оценивания успехов обучающихся. В-третьих, облегчается работа преподавателя по оцениванию работ,

создаются широкие возможности по автоматизации оценивания хода и результатов процесса обучения. Именно данное направление видится очень перспективным для дальнейшего процесса исследований.

Вклад авторов

М.А. Еремеев – идея исследования, развитие целей и задач, формулировка выводов.

О.В. Трубиенко – исследование процессов дистанционного образования.

И.И. Захарчук – изучение возможности применения программных средств для организации процесса дистанционного обучения.

Authors' contributions

M.A. Ereemeev – research of the distance learning processes.

O.V. Trubienko – study of the possibility of using software tools to organize the distance learning process.

I.I. Zakharchuk – research idea, the development of aims and objectives, the formulation of conclusions.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алтухов А.И., Багрецов С.А., Карпинчук Н.А., Чебурков М.А. Методика оценивания временных затрат на изучение курса учебной дисциплины с применением автоматизированных обучающих систем. *Известия СПбГТУ ЛЭТИ*. 2016;7:32–37.
2. Васильева Н.В., Кунтурова Н.Б., Прокофьева А.Л. Образовательные средства информационно-коммуникационных технологий в учебном процессе военного ВУЗа. *Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского*. 2018;661:207–214.
3. Калинин В.Н. Основные направления формирования и критерии оценивания общекультурных и профессиональных компетенций в цикле математических и естественнонаучных дисциплин. *Информационный бюллетень Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского*. 2014;121:19–27.
4. Алтухов А.И., Головина В.В., Калинин В.Н. Формирование и критерии оценивания компетенций в цикле математических и естественнонаучных дисциплин. *Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского*. 2014;642:210–215.
5. Кужекин Н.С., Чикуров В.А., Зиновьев С.В. Фонд оценочных средств как компонент основной профессиональной образовательной программы. *Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского*. 2015;648:202–209.
6. Алтухов А.И., Калинин В.Н., Чебурков М.А. Об опыте формирования и оценивания компетенций по дисциплинам профессионального цикла в системе военного образования. *Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского*. 2016;650:204–210.
7. Xie Y., Dervieux C., Riederer E. *R Markdown Cookbook*. Chapman and Hall & CRC Press; 2020. 360 p.

REFERENCES

1. Altukhov A.I., Bagretsov S.A., Karpinchuk N.A., Cheburkov M.A. Methodology of assessment of time spending on learning a course in the academic discipline with the use of automated training systems. *Izvestiya SPbSTU LETI = Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*. 2016;7:32–37 (in Russ.).
2. Vasil'eva N.V., Kunturova N.B., Prokof'eva A.L. Educational tools of information and communication technologies in the educational process of the military institution. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaiskogo = Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy*. 2018;661:207–214 (in Russ.).
3. Kalinin V.N. The main directions of formation and criteria for assessing general cultural and professional competencies in the cycle of mathematical and natural science disciplines. *Informatsionnyi byulleten' VoЕННО-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaiskogo = Information Bulletin of the Mozhaisky Military Aerospace Academy*. 2014;121:19–27 (in Russ.).
4. Altukhov A.I., Golovina V.V., Kalinin V.N. Forming and criteria of competence estimation in subjects of mathematical and naturally scientific cycle. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaiskogo = Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy*. 2014;642:210–215 (in Russ.).
5. Kuzhekin N.S., Chikurov V.A., Zinov'ev S.V. The assessment tools fund as a component of the basic professional educational program. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaiskogo = Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy*. 2015;648:202–209 (in Russ.).

8. Рогова В.А., Шамин Р.В. Оптимизационные процедуры в задаче маркетинга образовательных услуг на этапе формирования политики набора абитуриентов в вузы. *Российский технологический журнал*. 2020;8(5):91–102. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-91-102>
9. Panchenko L.F., et al. PhD student training: principles and implementation. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021;1840(1):12056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1840/1/012056>
10. Estrellado R.A., Freer E.A., Motsipak J., Rosenberg J.M., Velásquez I.C. *Data Science in Education Using R*. London: Routledge; 2020. 304 p. <https://doi.org/10.4324/9780367822842>
11. Ellerbrock C.R., Abbas B., Diccio M., Denmon J.M., Sabella L., Hart J. Relationships: The fundamental R in education. *Phi Delta Kappan*. 2015;96(8):48–51. <https://doi.org/10.1177/0031721715583963>
12. Nguyen S. Scholarly Git Experiences Part II: Git for Education. *IASGE*; 2019. URL: <https://investigating-archiving-git.gitlab.io/updates/git-for-education/>
13. Kelleher J. Employing Git in the classroom. In: *World Congress on Computer Applications and Information Systems (WCCAIS)*. 2014. <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.4202.0801>
14. Wilson G. *Teaching Tech Together: How to Make Your Lessons Work and Build a Teaching Community around them*. Routledge & CRC Press; 2019. 260 p.
6. Altukhov A.I., Kalinin V.N., Cheburkov M.A. The experience of formation and assessment of competencies in the disciplines of the professional cycle in the system of military education. *Trudy Voенно-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaiskogo = Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy*. 2016;650:204–210 (in Russ.).
7. Xie Y., Dervieux C., Riederer E. *R Markdown Cookbook*. Chapman and Hall & CRC Press; 2020. 360 p.
8. Rogova V.A., Shamin R.V. Optimization procedures in the problem of marketing educational services at the stage of forming a policy for recruiting applicants to universities. *Russian Technological Journal*. 2020;8(5):91–102 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-91-102>
9. Panchenko L.F., et al. PhD student training: principles and implementation. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021;1840(1):12056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1840/1/012056>
10. Estrellado R.A., Freer E.A., Motsipak J., Rosenberg J.M., Velásquez I.C. *Data Science in Education Using R*. London: Routledge; 2020. 304 p. <https://doi.org/10.4324/9780367822842>
11. Ellerbrock C.R., Abbas B., Diccio M., Denmon J.M., Sabella L., Hart J. Relationships: The fundamental R in education. *Phi Delta Kappan*. 2015;96(8):48–51. <https://doi.org/10.1177/0031721715583963>
12. Nguyen S. Scholarly Git Experiences Part II: Git for Education. *IASGE*; 2019. Available from URL: <https://investigating-archiving-git.gitlab.io/updates/git-for-education/>
13. Kelleher J. Employing Git in the classroom. In: *World Congress on Computer Applications and Information Systems (WCCAIS)*. 2014. <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.4202.0801>
14. Wilson G. *Teaching Tech Together: How to Make Your Lessons Work and Build a Teaching Community around them*. Routledge & CRC Press; 2019. 260 p.

Об авторах

Еремеев Михаил Алексеевич, д.т.н., профессор кафедры «Прикладные информационные технологии» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: eremeev_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57188205500, SPIN-код РИНЦ 3609-5733, <https://orcid.org/0000-0002-5511-4000>

Трубиенко Олег Владимирович, к.т.н., заведующий кафедрой «Прикладные информационные технологии» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: trubienko@mirea.ru. Scopus Author ID 57213680467, SPIN-код РИНЦ 1668-5640, <https://orcid.org/0000-0002-6809-8732>

Захарчук Иван Илларионович, к.т.н., доцент кафедры «Прикладные информационные технологии» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: zaharchuk@mirea.ru. Scopus Author ID 57222072783, SPIN-код РИНЦ 1634-5302

About the authors

Michail A. Ereemeev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Applied Information Technologies, Institute of Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: eremeev_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57188205500, RSCI SPIN-code 3609-5733, <https://orcid.org/0000-0002-5511-4000>

Oleg V. Trubienko, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Applied Information Technologies, Institute of Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: trubienko@mirea.ru. Scopus Author ID 57213680467, RSCI SPIN-code 1668-5640, <https://orcid.org/0000-0002-6809-8732>

Ivan I. Zakharchuk, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Department of Applied Information Technologies, Institute of Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: zaharchuk@mirea.ru. Scopus Author ID 57222072783, RSCI SPIN-code 1634-5302

Мировоззренческие основы технологии и общества
Philosophical foundations of technology and society

УДК 620.3
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-93-100>



ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

Нанoeлектроника и нанотехнологии: перспективные подходы в образовательном процессе

А.С. Сигов,
И.В. Гладышев,
А.Н. Юрасов[®]

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

Резюме

Цели. Нанoeлектроника – область современной электроники, занимающаяся разработкой физических и технологических основ создания интегральных схем с характерными топологическими размерами элементов, не превышающими 100 нм. Нанотехнологии включают создание и использование материалов, устройств и технических систем, функционирование которых определяется наноструктурой, то есть ее упорядоченными фрагментами размером от 1 до 100 нм. Цель работы – раскрыть концепцию подготовки высококвалифицированных специалистов в сфере нанoeлектроники и нанотехнологий на примере кафедры нанoeлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования РТУ МИРЭА.

Методы. Анализ перспективных подходов в образовательном процессе в рамках наноиндустрии.

Результаты. В статье выделены три фундаментальные составляющие образования в сфере наноиндустрии: физическая (изучение и поиск новых перспективных физических эффектов); материаловедческая, связанная с изучением, поиском и синтезом новых перспективных материалов; информационная (освоение современных пакетов программ и языков программирования для моделирования широкого спектра элементов и материалов наноиндустрии).

Выводы. Сочетание научных лабораторий и центров на кафедре нанoeлектроники позволило эффективно реализовать все три фундаментальные составляющие образования в сфере наноиндустрии. После окончания кафедры нанoeлектроники выпускники могут работать в ведущих институтах и научно-технических организациях России, стажироваться в организациях ближнего и дальнего зарубежья, преподавать в ведущих вузах и создавать собственные наукоемкие предприятия.

Ключевые слова: нанoeлектроника, нанотехнологии, образование

• Поступила: 10.03.2022 • Доработана: 11.05.2022 • Принята к опубликованию: 28.06.2022

Для цитирования: Сигов А.С., Гладышев И.В., Юрасов А.Н. Нанoeлектроника и нанотехнологии: перспективные подходы в образовательном процессе. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):93–100. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-93-100>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

LETTERS

Nanoelectronics and nanotechnology: promising approaches in the educational process

Alexander S. Sigov,
Igor V. Gladyshev,
Alexey N. Yurasov [®]

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

Abstract

Objectives. Nanoelectronics is concerned with the development of physical and technological foundations for the creation of integrated circuits comprised of elements whose topological dimensions do not exceed 100 nm. Nanotechnology includes the creation and use of materials, devices and technical systems whose functioning is determined by their nanostructure, i.e., comprising ordered fragments ranging from 1 to 100 nm in size. The present research is aimed at developing a concept for training highly qualified specialists in the field of nanoelectronics and nanotechnologies on the example of the Department of Nanoelectronics of the Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming at the MIREA – Russian Technological University.

Methods. Promising approaches for supporting the educational process within the nanoindustry are analyzed and compared.

Results. Three fundamental components of education in the field of nanoindustry can be distinguished: physical (the study and search for new promising physical effects); materials science, related to the study, search, and synthesis of new advanced materials; informatics (including mastering of modern software packages and programming languages for modeling a wide range of nanoindustry elements and materials).

Conclusions. All three fundamental components of education within nanoindustry have been effectively implemented by combining scientific laboratories and centers at the Department of Nanoelectronics. After graduating from the Department of Nanoelectronics, graduates can work for leading scientific institutes and technical organizations in Russia, intern at specialized organizations in neighboring and other countries, teach at leading universities, and start their own knowledge-intensive business.

Keywords: nanoelectronics, nanotechnology, education

• Submitted: 10.03.2022 • Revised: 11.05.2022 • Accepted: 28.06.2022

For citation: Sigov A.S., Gladyshev I.V., Yurasov A.N. Nanoelectronics and nanotechnology: promising approaches in the educational process. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):93–100. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-93-100>

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

Нанoeлектроника – область современной электроники, занимающаяся разработкой физических и технологических основ создания интегральных схем с характерными топологическими размерами элементов, не превышающими 100 нм. Принципиально важным становится тот факт, что для элементов таких размеров начинают преобладать квантовые эффекты. Электроника, использующая квантовые эффекты, – это основа новой, наногетероструктурной электроники. Можно выделить следующие

основные задачи нанoeлектроники: 1) разработка физических основ работы приборов с нанометровыми размерами, в первую очередь квантовых; 2) разработка физических основ технологических процессов; 3) разработка самих приборов и технологий их изготовления; 4) разработка интегральных схем с нанометровыми размерами и изделий электроники на основе нанoeлектронной элементной базы [1, 2].

Нанотехнологии – это новое направление науки и технологии, активно развивающееся в последние десятилетия. Нанотехнологии включают создание и использование материалов, устройств и технических

систем, функционирование которых определяется наноструктурой, то есть ее упорядоченными фрагментами размером от 1 до 100 нм. Отметим, что сам термин «нано» пришел из греческого языка и значит «карлик, гном». Как хорошо известно, один нанометр (нм) – это одна миллиардная доля метра или 10 \AA . Сам термин «нанотехнология» (nanotechnology) был введен в 1974 г. профессором-материаловедом из Токийского университета Норио Танигучи (Norio Taniguchi), который определил его как «технология производства, позволяющая достигать сверхвысокую точность и ультрамалые размеры ...порядка 1 нм ...» [1].

Наноиндустрия открывает широкие горизонты и спектр возможностей во многих отраслях промышленности и народного хозяйства. Среди них:

- элементы наноэлектроники и нанофотоники (полупроводниковые транзисторы и лазеры, фотодетекторы, солнечные элементы, различные сенсоры);
- устройства сверхплотной записи информации;
- телекоммуникационные, информационные и вычислительные технологии; суперкомпьютеры;
- видеотехника (плоские экраны, мониторы, видеопроекторы);
- молекулярные электронные устройства, в т.ч. переключатели и электронные схемы на молекулярном уровне;
- нанолитография и наноимпринтинг;
- топливные элементы и устройства хранения энергии; устройства микро- и наномеханики, в т.ч. молекулярные моторы и наномоторы, нанороботы;
- нанохимия и катализ, в т.ч. управление горением, нанесение покрытий, электрохимия и фармацевтика;
- авиационные, космические и оборонные приложения; устройства контроля состояния окружающей среды;
- целевая доставка лекарств и протеинов, биополимеры и заживление биологических тканей, клиническая и медицинская диагностика, создание искусственных мускулов, костей, имплантация живых органов;
- биомеханика;
- геномика;
- биоинформатика;
- биоинструментарий;
- регистрация и идентификация канцерогенных тканей, патогенов и биологически вредных агентов;
- безопасность в сельском хозяйстве и при производстве пищевых продуктов.

И конечно, современная оборонная промышленность не может обойтись без достижений наноэлектроники и нанотехнологий. Отметим, что это

далеко не полный перечень возможностей применения нанотехнологий. С каждым годом, открытием новых физических эффектов, синтезом перспективных материалов наноиндустрия охватывает все новые области науки, техники, производства. Поэтому важной задачей в современном обществе является подготовка высококвалифицированных специалистов в области наноиндустрии [2].

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОДХОДЫ К ОБУЧЕНИЮ В ОБЛАСТИ НАНОИНДУСТРИИ НА КАФЕДРЕ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

В РТУ МИРЭА подготовка специалистов в области наноэлектроники и нанотехнологий осуществляется на кафедре наноэлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования. В настоящее время в рамках данной подготовки существует два направления: 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» и 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника». Важно отметить, что в 2017 г. МИРЭА – Российский технологический университет стал единственным вузом России, удостоенным медали ЮНЕСКО «За вклад в развитие нанонауки и нанотехнологий». Награда вручена, в т.ч., за успехи в обучении студентов в этой области. Образовательные программы, связанные с наноэлектроникой и нанотехнологиями, реализует именно кафедра наноэлектроники.

По направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» студенты проходят подготовку в области современных технологий, материалов и изделий электронной техники, проектированию и применению электронных приборов и устройств, приобретают знания и профессиональные навыки в проведении теоретических и экспериментальных исследований, в компьютерном моделировании, проектировании, конструировании, технологии производства, использовании и эксплуатации материалов, компонентов, электронных приборов, устройств, установок вакуумной, плазменной, твердотельной, микроволновой, оптической, микро- и наноэлектроники различного функционального назначения.

Профильными дисциплинами по данному направлению являются:

- Электроника и микропроцессорная техника,
- Основы проектирования электронной компонентной базы,
- Системы автоматизированного проектирования в электронике,
- Материалы и элементы электронной техники,
- Технологии электронной компонентной базы,
- Перспективные технологические процессы микро- и наноэлектроники,
- Наноэлектроника,

- Физика низкоразмерных структур,
- Физика конденсированного состояния,
- Квантовая механика и статистическая физика,
- Организация научных исследований.

По направлению 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» область профессиональной деятельности – это теоретическое и экспериментальное исследование, математическое и компьютерное моделирование, проектирование, технология производства и эксплуатация материалов, приборов и устройств нано- и микросистемной техники различного функционального назначения, разработка и применение процессов нанотехнологии и методов нанодиагностики. Студенты изучают материалы и устройства нано- и микросистемной техники, приборы и устройства на их основе, технологии нанoeлектроники и методы нанодиагностики, оборудование процессов синтеза, диагностики и испытания материалов и компонентов нано- и микросистемной техники.

Профильными дисциплинами по данному направлению являются следующие:

- Планирование эксперимента, обработка и интерпретация данных,
- Физические принципы нанотехнологий и микросистемной техники,
- Квантовая механика и статистическая физика,
- Физика конденсированного состояния,
- Методы диагностики и анализа микро- и наносистем,
- Моделирование и проектирование микро- и наносистем,
- Материаловедение и процессы получения наноструктурированных материалов,
- Устройства микро- и наносистемной техники,
- Перспективные наноматериалы,
- Строение материалов,
- Организация научных исследований.

Важно отметить, что в настоящее время (а в будущем – тем более) наибольшие шансы на успех имеют специалисты, не только разбирающиеся в современной технике, но и хорошо знающие фундаментальные науки, прежде всего – физику, которая является основой новых высоких технологий и все больше проникает в другие прикладные науки. Особое внимание при обучении уделяется квантовой физике, которая служит основой нанотехнологий и создания новых приборов и устройств нанoeлектроники. В качестве примера можно назвать идею создания, так называемого, «квантового компьютера», способного сделать переворот в области информатики и средств связи. Способность физиков быстро переучиваться, овладевать новыми для себя видами деятельности высоко ценится. Многие молодые специалисты, получившие хорошее физическое образование, успешно работают не только в науке и на производстве, но и в экономике, и в сфере бизнеса.

В современной nanoиндустрии абсолютно невозможно обойтись без изучения и поиска новых материалов с перспективными свойствами, которые позволят как миниатюризировать устройства нанoeлектроники, так и повысить быстродействие элементов. И, наконец, невозможно рассматривать наносистемы без использования современных компьютерных технологий, которые позволяют анализировать большие объемы сложных данных.

Таким образом, можно выделить три фундаментальные составляющие образования в сфере nanoиндустрии: физическую (изучение и поиск новых перспективных физических эффектов); материаловедческую, связанную с изучением, поиском, синтезом новых перспективных материалов, и информационную, включающую освоение современных пакетов программ и языков программирования для моделирования широкого спектра элементов и материалов nanoиндустрии.

При реализации образовательных программ на кафедре нанoeлектроники достаточное время уделяется всем трем составляющим. Обучение проводится в рамках кафедральных лабораторий, из которых необходимо особо выделить специализированную учебно-научную лабораторию сверхбыстрой динамики ферроиков и специализированную учебно-научную лабораторию фемтосекундной оптики для нанотехнологий. В рамках данных лабораторий ведется активная учебно-научная работа:

- обучение студентов и аспирантов навыкам работы с современным лазерным оборудованием;
- проведение исследований в области сверхбыстрой динамики ферроидных материалов для микро-, опто- и нанoeлектроники;
- исследования в области терагерцового излучения;
- разработка элементов и устройств современной электроники;
- исследования в области наноматериалов и наносистем для двумерной электроники.

Многие преподаватели кафедры являются и научными сотрудниками таких научных центров РТУ МИРЭА, как научно-образовательный центр (НОЦ) «Магнитоэлектрические материалы и устройства», «Центр проектирования интегральных схем, устройств нанoeлектроники и микросистем», научно-исследовательский институт материалов твердотельной электроники, научно-образовательный центр (НОЦ) «Технологический центр».

В рамках НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства» ведется активная учебно-научная работа:

- обучение студентов навыкам работы с современным измерительным оборудованием;
- проведение исследований в области магнетизма, сегнетоэлектричества;

- исследование магнитоэлектрического эффекта, магнитострикции;
- разработка приборов и устройств современной наноэлектроники.

Следующим важным объектом является «Центр проектирования интегральных схем, устройств наноэлектроники и микросистем». Основные направления его работы:

- обучение, подготовка, переподготовка и повышение квалификации специалистов по тематике интегрированных систем автоматизированного проектирования электронной компонентной базы и аппаратуры;
- проектирование СБИС, «систем-на-кристалле» и «систем-в-корпусе»;
- исследовательская работа по методологии автоматизированного проектирования на основе развития теории и практики системного уровня абстракции описания работы интегральных схем;
- моделирование и разработка новых устройств и приборов микросистемной техники;
- реализация прототипов интегральных схем и проектирование электронных модулей на основе схем программируемой логики и разработка контрольно-измерительных систем различного назначения;
- приборно-технологическое моделирование новых приборов СВЧ твердотельной электроники на основе наногетероструктур AlGaIn.

Следует отметить научно-исследовательский институт материалов твердотельной электроники, направлениями работы которого являются:

- обучение студентов навыкам работы с современным оборудованием (лабораторные работы);
- проведение исследований в области физики конденсированного состояния и твердотельной электроники;
- исследования оптических, структурных и магнитных свойств современных материалов и элементов электроники;
- исследования в области наноматериалов и наносистем для современной электроники.

НОЦ «Технологический центр» ведет активную учебно-научную деятельность в области следующих технологий:

- технологии диэлектрических тонких пленок и наноструктур, в т.ч. активных диэлектриков;
- пленкообразующие растворы и методы формирования сегнетоэлектрических гетероструктур (PZT¹, BST², и др.);

¹ PZT – цирконат-титанат свинца, химическая формула $Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3$ ($0 \leq x \leq 1$). [PZT is lead zirconate titanate, chemical formula $Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3$ ($0 \leq x \leq 1$).]

² BST – титанат бария-стронция, химическая формула $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ ($0 \leq x \leq 1$). [BST is barium strontium titanate, chemical formula $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ ($0 \leq x \leq 1$).]

- пленкообразующие растворы и методы формирования пористых изолирующих диэлектриков с низкой диэлектрической проницаемостью (low-k) методами молекулярной самосборки;
- пленкообразующие растворы для получения различных оксидов (Si, Ti, Zr и др.) и неорганически-органических гибридов;
- процессы планаризации в BEOL³ и FEOL⁴ процессах;
- сегнетоэлектрические тонкие пленки, гетеро- и наноструктуры, композиты;
- CSD⁵ и ALD⁶ технологии.

Помимо лабораторий и научных центров РТУ МИРЭА студенты проходят практику, участвуют в НИР и выполняют выпускные квалификационные работы на целом спектре предприятий и вузов-партнеров. Данные организации являются и потенциальными работодателями. Это Росэлектроника, АО «НПП «Пульсар», АО «Плутон», АО «НПП «ТОРИЙ», ГК «Микрон», Физико-технологический институт Российской академии наук (РАН), Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, НИЦ «Курчатовский институт», ЦНИТИ «Техномаш», ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина» и многие другие.

На кафедре наноэлектроники реализуются бакалавриат и магистратура, есть и соответствующие направления аспирантуры, т.е. присутствует полный образовательный цикл по направлениям, связанным с нанотехнологиями и наноэлектроникой.

Студенты и аспиранты кафедры наноэлектроники активно участвуют в публикациях в ведущих международных изданиях (индексируемых в Web of Science и Scopus), включая журналы Q1 [3–6], в ведущих российских журналах (Перечень ВАК), представляют свои работы на международных и всероссийских конференциях, становятся призерами и медалистами всероссийских и международных олимпиад и конкурсов, получают гранты в т.ч. и мегагранты.

Большой личный вклад в дело подготовки кадров и в развитие кафедры, института и всего РТУ МИРЭА вносят преподаватели – ведущие ученые и специалисты в своей области. Особенно хочется вспомнить тех, кого уже, к сожалению, нет с нами. Это проректор РТУ МИРЭА по науке,

³ BEOL – back end of line – внутренняя часть линии, вторая часть изготовления интегральных схем. [BEOL (back end of line) is the second portion of IC fabrication.]

⁴ FEOL – front end of line – внешний интерфейс, первая часть изготовления интегральных схем. [FEOL (front end of line) is the first portion of IC fabrication.]

⁵ CVD – chemical vapor deposition – химическое осаждение покрытий из паровой фазы. [CVD is chemical vapor deposition of coatings.]

⁶ ALD – atomic layer deposition – атомно-слоевое осаждение. [ALD is atomic layer deposition.]

доктор физико-математических наук, профессор Морозов Александр Игоревич – замечательный педагог и автор большого числа научных статей (в частности, [7–9]). Научной группой А.И. Морозова предсказан новый тип доменных стенок, порожденных фрустрациями, в данных наноструктурах, построена их магнитная фазовая диаграмма. Рассчитан вклад «необычных» доменных стенок в гигантское магнетосопротивление. Доктор физико-математических наук, профессор Владимир Георгиевич Морозов – один из ведущих мировых специалистов в области неравновесной термодинамики, автор востребованного среди специалистов двухтомника «Статистическая механика неравновесных процессов» и замечательный педагог-методист. Также надо отметить доктора физико-математических наук Владимира Фёдоровича Мещерякова – ведущего специалиста в области электронного парамагнитного резонанса, доктора физико-математических наук, профессора Андрея Фёдоровича Волкова и доктора химических наук, профессора Иосифа Григорьевича Ерусалимчика, доцентов Бориса Владимировича Магницкого и Александра Борисовича Романова. Все они посвятили свою жизнь подготовке высококвалифицированных специалистов. Сейчас на кафедре работают и преподают их ученики.

В настоящее время активную научную работу ведут научные группы под руководством академика РАН А.С. Сигова, профессоров Е.Д. Мишиной, Ю.К. и Л.Ю. Фетисовых, А.А. Буша, В.С. Покатилова, К.А. Воротилова, В.И. Капустина, М.С. Блантера, А.Н. Юрасова, доцента Е.Ф. Певцова [10–20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении отметим, что сбалансированный подход сочетания научных лабораторий и центров в структуре вуза позволяет эффективно реализовать все фундаментальные составляющие образования в сфере nanoиндустрии. Выпускники кафедры nanoэлектроники имеют множество возможностей для построения карьеры:

- преподавание и научная работа в ведущих вузах страны;
- работа в научно-технических организациях России;
- стажировки и работа в профильных организациях ближнего и дальнего зарубежья;
- создание собственного наукоемкого предприятия.

Вклад авторов

А.С. Сигов – концептуализация, описание методологии и редактирование статьи.

И.В. Гладышев – сбор данных, проведение исследования.

А.Н. Юрасов – основная идея, сбор данных, проведение исследования, написание и редактирование статьи.

Authors' contributions

A.S. Sigov – conceptualization, description of the methodology, and editing the text of the article.

I.V. Gladyshev – data curation, conducting research.

A.N. Yurasov – the main idea, data curation, conducting research, writing and editing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Taniguchi N. On the basic concept of nano-technology. In: *Proc. Int. Conf. Prod. Eng. Tokyo. Part II. Japan Society of Precision Engineering*. 1974. P. 18–23.
2. Гусев А.И. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии*. М.: Физматлит; 2009. 416 с.
3. Buryakov A.M., et al. Effects of crystallographic orientation of GaAs substrate and the period of plasmon grid on THz antenna performance. *Ann. Phys.* 2021;533(8):2100041. <https://doi.org/10.1002/andp.202100041>
4. Saveliev D.V., Chashin D.V., Fetisov L.Y., Fetisov Y.K. Resonance magnetoelectric effect in a composite ferromagnet-dielectric-piezoelectric Langevin-type resonator. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2021;54(46):465002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac1d72>
5. Atanova A.V., Zhigalina O.M., Khmelenin D.N., Orlov G.A., Seregin D.S., Sigov A.S., Vorotilov K.A. Microstructure analysis of porous lead zirconate–titanate films. *J. Am. Ceram. Soc.* 2022;105(1):639–652. <https://doi.org/10.1111/jace.18064>

REFERENCES

1. Taniguchi N. On the basic concept of nano-technology. In: *Proc. Int. Conf. Prod. Eng. Tokyo. Part II. Japan Society of Precision Engineering*. 1974. P. 18–23.
2. Gusev A.I. *Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies* (*Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies*). Moscow: Fizmatlit; 2009. 416 p. (in Russ.).
3. Buryakov A.M., et al. Effects of crystallographic orientation of GaAs substrate and the period of plasmon grid on THz antenna performance. *Ann. Phys.* 2021;533(8):2100041. <https://doi.org/10.1002/andp.202100041>
4. Saveliev D.V., Chashin D.V., Fetisov L.Y., Fetisov Y.K. Resonance magnetoelectric effect in a composite ferromagnet-dielectric-piezoelectric Langevin-type resonator. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2021;54(46):465002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac1d72>
5. Atanova A.V., Zhigalina O.M., Khmelenin D.N., Orlov G.A., Seregin D.S., Sigov A.S., Vorotilov K.A. Microstructure analysis of porous lead zirconate–titanate films. *J. Am. Ceram. Soc.* 2022;105(1):639–652. <https://doi.org/10.1111/jace.18064>

6. Vishnevskiy A.S., Vorotyntsev D.A., Seregin D.S., Vorotilov K.A. Effect of surface hydrophobisation on the properties of a microporous phenylene-bridged organosilicate film. *J. Non Cryst. Solids*. 2022;576:121258. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.121258>
7. Berzin A.A., Sigov A.S., Morosov A.I. Phase diagram of the $O(n)$ model with defects of «random local anisotropy» type. *J. Magn. Magn. Mater.* 2018;459:256–259. <https://doi.org/10.1016/J.JMMM.2017.10.080>
8. Берзин А.А., Морозов А.И., Сигов А.С. Анизотропия кубического типа, создаваемая дефектами типа «случайная локальная анизотропия», и фазовая диаграмма $O(n)$ -модели. *Физика твердого тела*. 2017;59(12):2420–2424. <https://doi.org/10.21883/FTT.2017.12.45243.166>
9. Берзин А.А., Морозов А.И., Сигов А.С. Фаза Имри-Ма в нанокристаллическом ферромагнетике. *Физика твердого тела*. 2018;60(9):1689–1692. <https://doi.org/10.21883/FTT.2018.09.46385.050>
10. Telegin A.V., Barsaume S., Bessonova V.A., Sukhorukov Y.P., Nosov A.P., Kimel' A.V., Gan'shina E.A., Yurasov A.N., Lysina E.A. Magneto-optical response to tunnel magnetoresistance in manganite films with a variant structure. *J. Magn. Magn. Mater.* 2018;459:317–321. <https://doi.org/10.1016/J.JMMM.2017.10.006>
11. Ovcharenko S., Gaponov M., Klimov A., Tiercelin N., Pernod P., Mishina E., Sigov A., Preobrazhensky V. Photoinduced spin dynamics in a uniaxial intermetallic heterostructure $TbCo_2/FeCo$. *Sci. Rep.* 2020;10(1):15785. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72740-x>
12. Vishnevskiy A.S., Naumov S., Seregin D.S., Wu Y.-H., Chuang W.-T., Rasadujjaman M., Zhang J., Leu J., Vorotilov K.A., Baklanov M.R. Effects of methyl terminal and carbon bridging groups ratio on critical properties of porous organosilicate glass films. *Materials*. 2020;13(20):4484. <https://doi.org/10.3390/ma13204484>
13. Saveliev D.V., Belyaeva I.A., Chashin D.V., Fetisov L.Y., Shamonin M. Large Wiedemann effect in a magnetoactive elastomer. *J. Magn. Magn. Mater.* 2020;511:166969. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166969>
14. Burdin D.A., Chashin D.V., Ekonomov N.A., Gordeev S.N., Fetisov Y.K. Nonlinear magnetoelectric effect in a ferromagnetic-piezoelectric structure induced by rotating magnetic field. *Smart Mater. Struct.* 2019;28(10):107001. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab34e9>
15. Fetisov L.Y., Chashin D.V., Plekhanova D.D., Saveliev D.V., Fetisov Y.K. Electrical field control of magnetoelectric effect in composite structures with single-crystal piezoelectrics. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;470:93–96. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.11.010>
16. Sharaevskaya A.Y., Beginin E.N., Kalyabin D.V., Fetisov Y.K., Nikitov S.A. Surface spin waves in coupled easy-axis antiferromagnetic films. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;475:778–781. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.11.130>
17. Chashin D.V., Fetisov L.Y., Saveliev D.V., Fetisov Y.K. Magnetoelectric monolithic resonator based on the ferromagnetic-piezoelectric structure excited with a linear current. *Sensors Letters*. 2019;3(3):2500804. <https://doi.org/10.1109/LESENS.2019.2895966>
6. Vishnevskiy A.S., Vorotyntsev D.A., Seregin D.S., Vorotilov K.A. Effect of surface hydrophobisation on the properties of a microporous phenylene-bridged organosilicate film. *J. Non Cryst. Solids*. 2022;576:121258. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.121258>
7. Berzin A.A., Sigov A.S., Morosov A.I. Phase diagram of the $O(n)$ model with defects of “random local anisotropy” type. *J. Magn. Magn. Mater.* 2018;459:256–259. <https://doi.org/10.1016/J.JMMM.2017.10.080>
8. Berzin A.A., Sigov A.S., Morozov A.I. Cubic-type anisotropy created by defects of “random local anisotropy” type and phase diagram of the $O(n)$ -model. *Phys. Solid State*. 2017;59(12):2448–2452. <https://doi.org/10.1134/S1063783417120095> [Original Russian Text: Berzin A.A., Morozov A.I., Sigov A.S. Cubic-type anisotropy created by defects of “random local anisotropy” type and phase diagram of the $O(n)$ -model. *Fizika Tverdogo Tela*. 2017;59(12):2420–2424 (in Russ.). <https://doi.org/10.21883/FTT.2017.12.45243.166>]
9. Berzin A.A., Sigov A.S., Morosov A.I. The Imry-Ma phase in a nanocrystalline ferromagnet. *Phys. the Solid State*. 2018;60(9):1733–1736. <https://doi.org/10.1134/S1063783418090056> [Original Russian Text: Berzin A.A., Morozov A.I., Sigov A.S. The Imry-Ma phase in a nanocrystalline ferromagnet. *Fizika Tverdogo Tela*. 2018;60(9):1689–1692 (in Russ.). <https://doi.org/10.21883/FTT.2018.09.46385.050>]
10. Telegin A.V., Barsaume S., Bessonova V.A., Sukhorukov Y.P., Nosov A.P., Kimel' A.V., Gan'shina E.A., Yurasov A.N., Lysina E.A. Magneto-optical response to tunnel magnetoresistance in manganite films with a variant structure. *J. Magn. Magn. Mater.* 2018;459:317–321. <https://doi.org/10.1016/J.JMMM.2017.10.006>
11. Ovcharenko S., Gaponov M., Klimov A., Tiercelin N., Pernod P., Mishina E., Sigov A., Preobrazhensky V. Photoinduced spin dynamics in a uniaxial intermetallic heterostructure $TbCo_2/FeCo$. *Sci. Rep.* 2020;10(1):15785. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72740-x>
12. Vishnevskiy A.S., Naumov S., Seregin D.S., Wu Y.-H., Chuang W.-T., Rasadujjaman M., Zhang J., Leu J., Vorotilov K.A., Baklanov M.R. Effects of methyl terminal and carbon bridging groups ratio on critical properties of porous organosilicate glass films. *Materials*. 2020;13(20):4484. <https://doi.org/10.3390/ma13204484>
13. Saveliev D.V., Belyaeva I.A., Chashin D.V., Fetisov L.Y., Shamonin M. Large Wiedemann effect in a magnetoactive elastomer. *J. Magn. Magn. Mater.* 2020;511:166969. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166969>
14. Burdin D.A., Chashin D.V., Ekonomov N.A., Gordeev S.N., Fetisov Y.K. Nonlinear magnetoelectric effect in a ferromagnetic-piezoelectric structure induced by rotating magnetic field. *Smart Mater. Struct.* 2019;28(10):107001. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab34e9>
15. Fetisov L.Y., Chashin D.V., Plekhanova D.D., Saveliev D.V., Fetisov Y.K. Electrical field control of magnetoelectric effect in composite structures with single-crystal piezoelectrics. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;470:93–96. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.11.010>
16. Sharaevskaya A.Y., Beginin E.N., Kalyabin D.V., Fetisov Y.K., Nikitov S.A. Surface spin waves in coupled easy-axis antiferromagnetic films. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;475:778–781. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.11.130>

18. Burdin D.A., Ekonomov N.A., Chashin D.V., Fetisov Y.K., Gordeev S.N. Magnetolectric doubling and mixing of electric and magnetic field frequencies in a layered multiferroic heterostructure. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;485:36–42. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.04.037>
19. Fetisov L.Y., Chashin D.V., Saveliev D.V., Afanasiev M.S., Simonov-Emel'yanov I.D., Vopson M.M., Fetisov Y.K. Magnetolectric direct and converse resonance effects in a flexible ferromagnetic-piezoelectric polymer structure. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;485:251–256. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.04.085>
20. Горбатова А.В., Хусьяинов Д.И., Ячменев А.Э., Хабибуллин Р.А., Пономарев Д.С., Буряков А.М., Мишина Е.Д. Фотопроводящий ТГц-детектор на основе сверхрешеточной гетероструктуры с плазмонным усилением. *Письма в Журнал технической физики.* 2020;46(22):10–14. <http://doi.org/10.21883/PJTF.2020.22.50300.18442>
17. Chashin D.V., Fetisov L.Y., Saveliev D.V., Fetisov Y.K. Magnetolectric monolithic resonator based on the ferromagnetic-piezoelectric structure excited with a linear current. *Sensors Letters.* 2019;3(3):2500804. <https://doi.org/10.1109/LSENS.2019.2895966>
18. Burdin D.A., Ekonomov N.A., Chashin D.V., Fetisov Y.K., Gordeev S.N. Magnetolectric doubling and mixing of electric and magnetic field frequencies in a layered multiferroic heterostructure. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;485:36–42. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.04.037>
19. Fetisov L.Y., Chashin D.V., Saveliev D.V., Afanasiev M.S., Simonov-Emel'yanov I.D., Vopson M.M., Fetisov Y.K. Magnetolectric direct and converse resonance effects in a flexible ferromagnetic-piezoelectric polymer structure. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;485:251–256. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.04.085>
20. Gorbatova A.V., Khusyainov D.I., Yachmenev A.E., Khabibullin R.A., Ponomarev D.S., Buryakov A.M., Mishina E.D. A photoconductive THz detector based on superlattice heterostructure with plasmon amplification. *Tech. Phys. Lett.* 2020;46(22):1111–1115. <http://doi.org/10.1134/S1063785020110218>
[Original Russian Text: Gorbatova A.V., Khusyainov D.I., Yachmenev A.E., Khabibullin R.A., Ponomarev D.S., Buryakov A.M., Mishina E.D. A photoconductive THz detector based on superlattice heterostructure with plasmon amplification. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki.* 2020;46(22):10–14 (in Russ.). <http://doi.org/10.21883/PJTF.2020.22.50300.18442>]

Об авторах

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, президент ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sigov@mirea.ru. Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, SPIN-код РИНЦ 2869-5663.

Гладышев Игорь Васильевич, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры наноэлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: i_gladyshev@mirea.ru. Scopus Author ID 6701612553, ResearcherID N-1535-2016, SPIN-код РИНЦ 6735-1887, <https://orcid.org/0000-0002-7627-4978>

Юрасов Алексей Николаевич, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры наноэлектроники, заместитель директора Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: alexey_yurasov@mail.ru. Scopus Author ID 6602974416, ResearcherID M-3113-2016, SPIN-код РИНЦ 4259-8885.

About the authors

Alexander S. Sigov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, President, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sigov@mirea.ru. Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, RSCI SPIN-code 2869-5663.

Igor V. Gladyshev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Nanoelectronics, Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: i_gladyshev@mirea.ru. Scopus Author ID 6701612553, ResearcherID N-1535-2016, RSCI SPIN-code 6735-1887, <https://orcid.org/0000-0002-7627-4978>

Alexey N. Yurasov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of Nanoelectronics, Deputy Director of the Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: alexey_yurasov@mail.ru. Scopus Author ID 6602974416, ResearcherID M-3113-2016, RSCI SPIN-code 4259-8885.

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический университет».
119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.
Подписано в печать 29.07.2022 г.
Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.
Уч.-изд. листов 12.75.
Тираж 100 экз. Заказ № 627.

Подписку на печатную версию
Russian Technological Journal можно оформить
через ООО «Агентство «Книга-Сервис», www.akc.ru.
Подписной индекс: **79641**.

Printed in MIREA – Russian Technological University.
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russian
Federation.
Signed to print July 29, 2022.
Format 60 × 90/8. Digital print.
C.p.l. 12.75.
100 copies. Order No. 627.

Subscription to the *Russian Technological
Journal* printed version can be made through
the *Kniga-Servis* Agency, www.akc.ru.
Subscription index: **79641**.

