

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 наноэлектроника.
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
2023, том 11, № 2

Russian Technological Journal
2023, Vol. 11, No. 2

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



Russian Technological Journal 2023, том 11, № 2

Дата опубликования 31 марта 2023 г.

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

Периодичность: один раз в два месяца.

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

Учредитель и издатель:

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

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

Главный редактор:

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

Редакция:

Зав. редакцией	к.т.н. Г.Д. Середина
Научный редактор	д.т.н., проф. Г.В. Куликов
Выпускающий редактор	А.С. Алексеенко
Технический редактор	Д.В. Трофимова

119571, г. Москва, пр-т Вернадского, 86, оф. Л-119.
Тел.: +7(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).

Индекс по объединенному каталогу «Пресса России» 79641.

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

Russian Technological Journal 2023, Vol. 11, No. 2

Publication date March 31, 2023.

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

Periodicity: bimonthly.

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

Founder and Publisher:

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

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

Editor-in-Chief:

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

Editorial staff:

Managing Editor	Cand. Sci. (Eng.) Galina D. Seredina
Scientific Editor	Dr. Sci. (Eng.), Prof. Gennady V. Kulikov
Executive Editor	Anna S. Alekseenko
Technical Editor	Darya V. Trofimova

86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571 Russia.
Phone: +7(495) 246-05-55 (#2-88).
E-mail: seredina@mirea.ru.

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

The subscription index of *Pressa Rossii*: 79641.

Редакционная коллегия

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

Editorial Board

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

Содержание

Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности

7 *А.В. Васильев, А.О. Мельников, С.А. Лесько*
Применение робастной нейросетевой фильтрации в задачах построения интеллектуальных интерфейсов

20 *К. Kumar, R. Parameswaran*
Bibliometric analysis of holographic data storage literature

33 *Ю.П. Перова, В.Р. Григорьев, Д.О. Жуков*
Модели и методы анализа сложных сетей и социальных сетевых структур

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния

50 *Н.В. Зенченко, Д.В. Лаврухин, И.А. Глинский, Д.С. Пономарев*
Повышение эффективности оптико-терагерцового преобразователя за счет профилированных сапфировых волокон

Математическое моделирование

58 *М.О. Быкова, В.А. Баландин*
Методические особенности анализа фрактальной размерности сердечного ритма

72 *Д.А. Карпов, В.И. Струченков*
Оптимизация параметров сплайна при аппроксимации многозначных функций

84 *И.С. Пулькин, А.В. Татаринцев*
Экстремум в задаче о парных сравнениях

92 *И.М. Утяшев, А.Ф. Фатхелисламов*
Идентификация продольного надреза стержня по собственным частотам колебаний

Contents

Information systems. Computer sciences. Issues of information security

- 7** *Anton V. Vasiliev, Alexey O. Melnikov, Sergey A. Lesko*
Robust neural network filtering in the tasks of building intelligent interfaces
- 20** *Kutty Kumar, R. Parameswaran*
Bibliometric analysis of holographic data storage literature
- 33** *Julia P. Perova, Vitaly R. Grigoriev, Dmitry O. Zhukov*
Models and methods for analyzing complex networks and social network structures

Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

- 50** *Nikolay V. Zenchenko, Denis V. Lavrukhin, Igor A. Glinskiy, Dmitry S. Ponomarev*
Improving the efficiency of an optical-to-terahertz converter using sapphire fibers

Mathematical modeling

- 58** *Margarita O. Bykova, Vyacheslav A. Balandin*
Methodological features of the analysis of the fractal dimension of the heart rate
- 72** *Dmitry A. Karpov, Valery I. Struchenkov*
Optimization of spline parameters in approximation of multivalued functions
- 84** *Igor S. Pulkin, Andrey V. Tatarintsev*
Extremum in the problem of paired comparisons
- 92** *Ilmur M. Utyashev, Alfir F. Fatkhelislamov*
Identification of a longitudinal notch of a rod by natural vibration frequencies

УДК 004.942
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-7-19>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Применение робастной нейросетевой фильтрации в задачах построения интеллектуальных интерфейсов

А.В. Васильев[@],
А.О. Мельников,
С.А. Лесько

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[@] Автор для переписки, e-mail: bysslaev@gmail.com

Резюме

Цели. В последние годы возрос научный интерес к построению интеллектуальных интерфейсов для управления компьютером на основе биометрических данных. Одним из источников таких данных служит сигнал электромиографии (ЭМГ). Сигнал ЭМГ можно использовать для классификации жестов рук человека. Это позволяет организовать интуитивно понятный интерфейс «человек – компьютер». Основными проблемами при использовании сигналов ЭМГ являются наличие нелинейных шумов в сигнале и значительное влияние индивидуальных особенностей человека. Цель работы – исследование возможностей применения нейронных сетей для фильтрации индивидуальных компонент сигнала ЭМГ.

Методы. Используются математические методы обработки сигналов и методы машинного обучения.

Результаты. Проведен анализ исследований по теме обработки ЭМГ-сигналов. Предложена концепция интеллектуальной обработки биологических сигналов. Разработана модель фильтрации сигнала, построена структура сверточной нейронной сети на основе технологий Python 3, TensorFlow и Keras. Проведен эксперимент на наборе данных ЭМГ по фильтрации индивидуальных компонент сигнала.

Выводы. Продемонстрирована возможность применения искусственных нейронных сетей для выявления и подавления индивидуальных особенностей человека в биологических сигналах. При обучении сети основной упор делался на индивидуальные особенности, тестируя сеть на данных, полученных от субъектов, не участвующих в процессе обучения. Достигнуто уменьшение индивидуального шума в среднем на 5%. Для решения задачи классификации сигнала ЭМГ данный результат поможет избежать переобучения сети и повысить точность классификации жестов для новых пользователей.

Ключевые слова: цифровая обработка сигнала, частотная фильтрация, электромиография, машинное обучение, нейронные сети, интерфейсы, управление жестами

• Поступила: 17.06.2022 • Доработана: 22.09.2022 • Принята к опубликованию: 09.02.2023

Для цитирования: Васильев А.В., Мельников А.О., Лесько С.А. Применение робастной нейросетевой фильтрации в задачах построения интеллектуальных интерфейсов. *Russ. Technol. J.* 2023;11(2):7–19. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-7-19>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Robust neural network filtering in the tasks of building intelligent interfaces

Anton V. Vasiliev[@],
Alexey O. Melnikov,
Sergey A. Lesko

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
[@] Corresponding author, e-mail: bysslaev@gmail.com

Abstract

Objectives. In recent years, there has been growing scientific interest in the creation of intelligent interfaces for computer control based on biometric data, such as electromyography signals (EMGs), which can be used to classify human hand gestures to form the basis for organizing an intuitive human-computer interface. However, problems arising when using EMG signals for this purpose include the presence of nonlinear noise in the signal and the significant influence of individual human characteristics. The aim of the present study is to investigate the possibility of using neural networks to filter individual components of the EMG signal.

Methods. Mathematical signal processing techniques are used along with machine learning methods.

Results. The overview of the literature on the topic of EMG signal processing is carried out. The concept of intelligent processing of biological signals is proposed. The signal filtering model using a convolutional neural network structure based on Python 3, TensorFlow and Keras technologies was developed. Results of an experiment carried out on an EMG data set to filter individual signal components are presented and discussed.

Conclusions. The possibility of using artificial neural networks to identify and suppress individual human characteristics in biological signals is demonstrated. When training the network, the main emphasis was placed on individual features by testing the network on data received from subjects not involved in the learning process. The achieved average 5% reduction in individual noise will help to avoid retraining of the network when classifying EMG signals, as well as improving the accuracy of gesture classification for new users.

Keywords: digital signal processing, frequency filtering, electromyography, machine learning, neural networks, interfaces, gesture manipulation

• Submitted: 17.06.2022 • Revised: 22.09.2022 • Accepted: 09.02.2023

For citation: Vasiliev A.V., Melnikov A.O., Lesko S.A. Robust neural network filtering in the tasks of building intelligent interfaces. *Russ. Technol. J.* 2023;11(2):7–19. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-7-19>

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

Одним из ключевых моментов при проектировании программного обеспечения является выбор способа коммуникации с человеком. Для этого используется набор унифицированных конструктивных, аппаратных и программных средств, необходимых для взаимодействия различных функциональных элементов системы. Набор таких элементов называется интерфейсом. Особенно важен интерфейс между человеком и программным обеспечением. Именно интерфейс стандартизирует взаимодействие

и определяет границы функциональных возможностей работы с программным обеспечением. Понятие «интерфейс» тесно связано с удобством использования (юзабилити) программных систем. В первую очередь такое удобство связано с графическим интерфейсом пользователя. Интерфейс считается удобным, если пользователю требуются наименьшие затраты времени на использование информационной системы. Второй параметр, влияющий на удобство использования, – это простота и время обучения нового пользователя работе с информационной системой. Хороший интерфейс должен быть интуитивно

понятным, иметь как можно меньше скрытых зависимостей. Время обучения пользователя взаимодействию с программным обеспечением должно быть минимальным. Помимо графического интерфейса, информационная система может иметь и некоторый командно-программный интерфейс, представляющий из себя набор сообщений (команд), которые могут восприниматься программной системой и обрабатываться с помощью программного интерфейса приложения (API). Удобство такого вида интерфейса оценивается количеством команд, которые требуется использовать, чтобы выполнить целевое воздействие на систему. При этом желательно, чтобы команды для разных целевых воздействий не дублировались. Перечисленные требования накладывают серьезную ответственность на разработчиков при проектировании интерфейсов программных продуктов и систем.

Человек в современном цифровом пространстве становится стремительно расширяющей свои возможности интерактивной системой. При этом диапазон интерактивности меняется от системы к системе. В ряде систем предполагается ограниченная интерактивность, например, в авиационной или аэрокосмической отрасли, где условия работы человека с информационной системой ограничены физическими условиями. С другой стороны, интерактивные системы повседневной жизни, такие как мультимедийные устройства и игровые комплексы, не накладывают существенных физических ограничений на набор взаимодействий человека (пользователя) с информационной системой.

Для повышения эффективности и удобства использования информационной системы ученые ищут новые способы организации интерфейсов. Среди факторов, снижающих качество использования информационных систем, можно выделить технические, физические и информационные. Под техническими факторами понимается качество технологий, применяемых как при разработке программного обеспечения (скорость сети, количество памяти), так и при создании аппаратного обеспечения (например, качество монитора компьютера или камеры). Физические факторы – это физические условия окружающей среды во время использования программной системы, такие как влажность, освещенность, видимость, возможность выполнения физических движений и т.д. Под информационными факторами понимается проработка интерфейса программной системы для удобства ее использования в целом, например, размер кнопок в графическом интерфейсе, возможность ввода текста, возможность сохранения данных и т.д.

Интерфейсы можно разделить на несколько крупных групп: текстовые, графические, голосовые, с использованием видео и гибридные. Для повышения

удобства использования следует рассматривать каждую из этих групп. В настоящее время активно развиваются интерфейсы на основе аудио- и видеоинформации, полученной от внешних сенсоров. Из сложностей использования видео можно выделить следующие факторы: посторонний шум, плохая видимость, физические препятствия между камерой и объектом съемки, отсутствие нужного ракурса для съемки или отсутствие возможности вербальной коммуникации (режим тишины). При этом интерфейсы на основе аудио- или видео расширяют зоны использования программных систем. Если при использовании систем с текстовым или графическим интерфейсом обязательно требуется консоль для ввода или экран плюс устройства ввода (клавиатура), то для интерфейса на основе аудио или видео требуется только микрофон и видеокамера. Это дает возможность человеку освободить руки и повысить качество пользовательского опыта при работе с системой, используя руки в качестве дополнительного канала управления. Для обхода перечисленных ограничений интерфейсов на основе видеоинформации и сохранения их преимуществ требуется использовать новый тип интерфейсов на основе гибридного или иного, биологического, типа. Биологические интерфейсы широко распространены в медицине. Только в медицине человек взаимодействует с информационными системами в основном пассивно, позволяя устройству извлекать и обрабатывать информацию, получаемую с помощью интерфейса. При этом потенциал использования биологических интерфейсов гораздо шире. Их можно применять для построения полноценных информационных систем с высоким уровнем удобства использования.

В качестве дополнительного канала обмена информацией могут использоваться измерения биологических сигналов, таких как электромиография (ЭМГ), электроэнцефалография (ЭЭГ) и т.п. В последние годы ведутся инновационные исследования по разработке и использованию одежды, снабженной разного рода сенсорами и датчиками [1, 2], которые позволяют регистрировать физиологическую активность человека. Наиболее популярно в подобных исследованиях использование элементов одежды, снабженных сенсорами для регистрации сигналов ЭМГ [3, 4]. Одежда, снабженная ЭМГ-датчиками, востребована во многих областях: от любой физически активной деятельности (строительные работы, спорт) до наиболее спокойной (офисная работа). ЭМГ позволяет регистрировать электрическую активность, возникающую при возбуждении мышечных волокон.

Сигнал ЭМГ используется для диагностики нервно-мышечных заболеваний, в психофизиологии, при изучении двигательной активности, в исследованиях

высшей нервной деятельности, для оценки результатов протезирования и ортопедии, в инженерной психологии. Помимо прочего, в последнее время набирает популярность исследования возможности организации безмолвного интерфейса – интерфейса, который не требует голосового ввода и позволяет управлять информационной системой путем артикуляции.

В данной работе внимание сконцентрировано на использовании ЭМГ-сигнала в качестве основы интерфейса «человек – компьютер». Множество исследований направлено на анализ ЭМГ-сигнала для построения систем умного протезирования [5, 6] и систем, управляемых жестами [7]. Помимо ЭМГ-сигнала для решения задач классификации жестов используются даже ультразвуковые сканеры [8]. В качестве основных проблем исследователи определяют сложность выделения конкретных управляющих единиц в ЭМГ-сигнале. Отмечается высокая зависимость точности классификации от конкретного человека, с которым проводится эксперимент [9, 10]. Для решения таких проблем используют методы декомпозиции [11] и кластеризации сигналов ЭМГ для выделения групп мышц, участвующих при конкретном жесте руки [3]. Для минимизации шумов используются такие методы преобразования сигнала как метод главных компонент, автоэнкодеры и др. [12, 13].

1. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ряде исследований, посвященных классификации ЭМГ-сигнала, поднимается проблема его фильтрации. В большинстве работ используется только частотная фильтрация, но исследователи применяют и другие подходы. Наиболее эффективным методом является предварительная кластеризация сигналов ЭМГ с целью выделения моторных единиц. Однако данный подход приводит к необратимому искажению сигнала и не относится к фильтрации.

В [14] авторами разработана система идентификации мышц с помощью игольчатой ЭМГ для задач протезирования. Основными характеристиками этой модели являются следующие: использование игольчатой ЭМГ (16 датчиков) и кинематических перчаток, предобработка сигналов фильтрами нижних (10 Гц) и верхних (100 Гц) частот, использование искусственных нейронных сетей. Набор данных состоит из 5 движений по 10 повторений каждого движения. Входными данными для нейронной сети являются корреляционные матрицы. Преимущество модели – компактность полносвязной нейронной сети (3 скрытых слоя). К недостаткам модели относится сравнительно низкая точность (90.1% на тестовом наборе) и необходимость использования кинематических перчаток. Негативное влияние при

оценке модели связано с низкой точностью распознавания сигналов от ряда мышц из набора данных. Авторы отмечают, что ошибки в классификации могут быть связаны с недостаточно точной маркировкой эталонных данных.

В [15] авторами проведен эксперимент по сравнению статистических подходов к классификации ЭМГ-сигнала с моделями машинного обучения. Задачей исследователей была бинарная классификация сигнала ЭМГ. Цель заключалась в распознавании промежутков приемов пищи в ежедневной деятельности человека. Сравнение проводилось между моделями SVM [16], RandomForest [17], LogisticRegression [18], XGBoost [19], LightGBM [20] и LSTM [21], Conv-LSTM [22]. К преимуществам работы стоит отнести обширное сравнение статистических методов и методов машинного обучения. Достигнута точность 94.76% на сбалансированном наборе данных для статистических методов и 95.35% – на несбалансированном наборе данных. Наиболее эффективным статистическим методом для классификации ЭМГ-сигнала оказался XGBoost. Использование нейронных сетей типа LSTM позволило улучшить точность классификации до 97%, однако исследователи отмечают проблему, связанную с необходимостью большого количества данных для обучения такого вида сетей, а также недостаточное количество данных для методов машинного обучения, загрязнение данных совокупными действиями, плохое подключение Bluetooth, особенности правшей и левшей.

В [3] авторами разработано устройство для считывания ЭМГ-сигнала с питанием от солнечной энергии. Основными характеристиками разработанной модели является сверхнизкое энергопотребление и интеллектуальная система локализации датчиков ЭМГ на запястье пользователя. Данные для эксперимента были собраны с 20 человек и включали 15 уникальных движений кисти руки. Достигнута точность 95.3% при классификации 15 жестов. Одной из проблем для подобного рода задач является положение сенсоров на запястье человека. Методы анализа ЭМГ-сигналов обладают высокой чувствительностью к положению сенсоров. Это приводит к тому, что модель необходимо каждый раз переобучать при изменении положения датчиков. Предлагается решить эту проблему с помощью локализации сенсоров на запястье с использованием интеллектуальной обработки данных от емкостных датчиков. Для анализа сигналов ЭМГ была проведена кластеризация всех мышц запястья на 8 групп. Чтобы регулировать положение браслета на запястье использовалась калибровка на основании данных от 15 сенсоров с применением свертки. Для классификации жестов была использована сверточная нейронная сеть с двумя слоями

свертки с активационной функцией ReLU (Rectified linear unit). Отмечается, что именно такое малое количество слоев позволяет решить проблему переобучения. Недостаток метода – значительное падение точности классификации движений в статичном положении (снижение точности на 3%). Кроме того, в работу не были включены жесты, описывающие мелкую моторику пальцев.

В [23] разработана модель классификации жестов на основе ультразвукового исследования. Для классификации жестов использовалось ультразвуковое представление мышц предплечья.

2. ПРИРОДА ЭМГ-СИГНАЛА

ЭМГ – метод исследования биоэлектрических потенциалов, возникающих в скелетных мышцах человека и животных при возбуждении мышечных волокон.

Существует три типа ЭМГ:

- 1) ЭМГ с использованием игольчатых электродов, которые вводятся в мышцу;
- 2) стимуляционная ЭМГ;
- 3) ЭМГ с использованием накожных электродов.

Игольчатая ЭМГ позволяет получить наиболее точное представление об электрической активности, возникающей во время мышечных возбуждений, но требует физического проникновения в мышечную ткань человека. Инвазивная природа метода является ограничением для использования в качестве основы для интерфейса информационной системы.

Стимуляционная ЭМГ – это вид неинвазивной ЭМГ, при котором применяются накожные поверхностные электроды, позволяющие оценить проводимость импульса по периферическим нервам в ответ на их стимуляцию электрическим током малой силы. Такой вид ЭМГ применяется, в частности, для диагностики заболеваний периферической нервной системы.

Поверхностная ЭМГ – вид ЭМГ, при котором применяются накожные поверхностные электроды. В отличие от стимуляционной ЭМГ, данный вид не предполагает стимуляции нервной системы, а наоборот, заключается только в регистрации электрической активности при активном возбуждении и расслаблении мышечных тканей.

При слабом сокращении мышц регистрируется или потенциал отдельной двигательной единицы, или потенциал многих двигательных единиц. При среднем по силе и сильном сокращении мышц наблюдается интерференционная ЭМГ, при которой практически невозможно выявить потенциалы отдельных двигательных единиц. В состоянии покоя у людей, не имеющих проблем в области нервной системы, обычно не выявляются какие-либо активности электрического потенциала либо регистрируются электрические потенциалы отдельных мышечных волокон.

В простом случае будем рассматривать следующий сценарий: на одиночное воздействие мышца реагирует одиночным сокращением. При этом можно выделить три фазы:

- латентный период (от 2–3 до 10 мс), длящийся от момента нанесения раздражения до начала сокращения;
- фаза укорочения или сокращения (40–50 мс);
- фаза расслабления (около 50 мс).

В состав устройства регистрации ЭМГ-сигнала входят электроды, которые отводят потенциалы мышцы, усилитель этих потенциалов и регистрирующее устройство.

Основными параметрами кривой ЭМГ-сигнала являются:

- амплитуда (1 мкВ – 50 мВ),
- частота (0.5 – 500 Гц).

Для более наглядного анализа ЭМГ-сигнал представляется в виде декомпозиции частот и амплитуд, полученных с помощью преобразования Фурье.

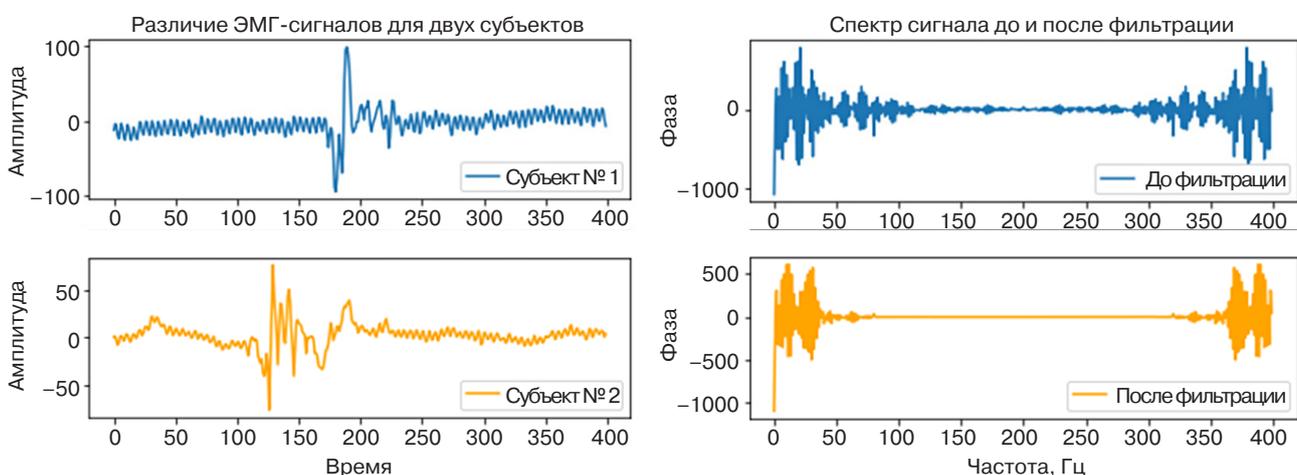


Рис. 1. Пример ЭМГ-сигнала во временной и частотной области

Любая часть мышцы может содержать мышечные волокна, принадлежащие 20–50 моторным клеткам. В результате движения происходит возбуждение множества моторных единиц. Совокупный потенциал действия может быть зарегистрирован с помощью оборудования ЭМГ и будет представлен во времени в следующем виде:

$$S(t) = \sum_j \text{ППДМК}_j(t) + n(t) = \sum_j \sum_i k_j f\left(\frac{t - \theta_{ij}}{a_j}\right) + n(t),$$

где ППДМК_{*j*} – последовательность потенциала действия моторной клетки; *k_j* – амплитудный фактор для мышцы *j*-й моторной клетки; *f* – форма потенциала действия; *θ_{ij}* – время возникновения ППДМК; *a_j* – изменение масштаба; *n(t)* – добавочный шум.

В данной работе используется сигнал, полученный при использовании поверхностной ЭМГ с одним каналом. Использование одноканальной системы позволяет упростить регистрацию сигнала, абстрагируясь от временной синхронизации данных с параллельных каналов ЭМГ.

Основной проблемой при использовании сигналов ЭМГ в качестве интерфейса управления является их изменчивость и неустойчивость, в первую очередь из-за внешних помех, смещения электродов, потливости кожи и утомляемости мышц.

Попытки устранить влияние мышечной утомляемости заключаются в использовании переключающих устройств при изменении сигнала либо в применении статических методов, например, фильтрации.

Успешность реализации интерфейса управления устройств определяется степенью достоверности расшифровки биопотенциалов мышц в зарегистрированном сигнале ЭМГ при планируемом движении. Точному определению типа движения препятствует низкое отношение сигнал/шум в измерительной системе.

Искажения сигнала могут возникать из-за побочного влияния сигналов электрической активности сердца, сдвигов электродов относительно назначенного положения, изменения биопотенциалов мышц, шумов электронных устройств, окружающего электромагнитного излучения и т.п.

На сегодняшний день популярным методом для определения типов движения является использование различных классификаторов.

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для построения эффективного интерфейса, основанного на сигналах ЭМГ, требуется решить ряд задач. Во-первых, необходимо обработать от шумов сигнал, регистрируемый при возбуждении мышц человека. Во-вторых, сигнал нужно каким-либо образом классифицировать, чтобы полученные действия

или шаблоны использовать для создания управляющих воздействий информационной системой. В данной работе мы будем решать задачу очистки сигнала от шумов. Основной проблемой является нелинейный характер шума. Под шумом мы будем понимать некоторую нелинейную компоненту сигнала, которая зависит от параметров регистрации сигнала ЭМГ с биологического объекта. Количество шума зависит от таких параметров, как уровень напряжения в сети ноутбука, параметры усилителя сигнала, качество электродов, качество подготовки поверхности кожи для установки электродов ЭМГ и т.д.

Сигнал **X** представляет собой последовательность отчетов *x_i*, *i* = $\overline{1, N}$. Предполагается, что данный сигнал может содержать нелинейный шум **Z**, который можно подавить с помощью фильтра:

$$\mathbf{I} = \mathbf{X} \times \mathbf{h},$$

где **I** – полезный сигнал, **X** – зашумленный сигнал, **h** – нейросетевой фильтр.

Мы сравнили данные для одного типа жеста, полученные от двух субъектов (рис. 2). Как видно из рисунка, эти сигналы отличаются друг от друга не только фазой сигнала, но и формой. Для минимизации данных различий применяется нейросетевая фильтрация.

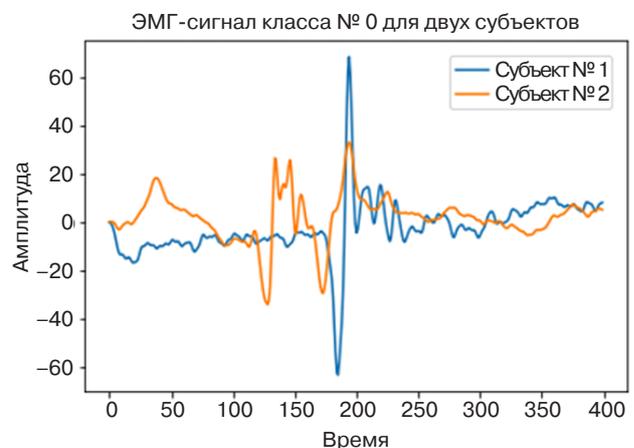


Рис. 2. ЭМГ-сигнал для одного жеста, полученный от двух разных субъектов

Цель нейросетевой фильтрации заключается в избавлении от индивидуальной компоненты сигнала, которая варьируется у разных людей. Такой вид искажений называется индивидуальным шумом. Под индивидуальным шумом понимается нелинейная компонента сигнала, которая может быть определена в следующем виде:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{X} - \mathbf{I},$$

где **Z** – индивидуальный шум.

Сигнал от первого субъекта



Сигнал от второго субъекта

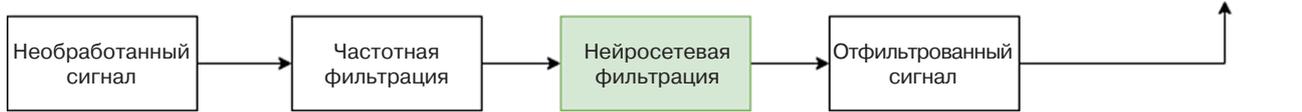


Рис. 3. Схема нейросетевой фильтрации

Задача состоит в нахождении параметров фильтра \mathbf{h} , который позволит минимизировать различие в сигналах, описывающих один и тот же класс жеста, но полученных от разных субъектов. Такую задачу можно описать в виде:

$$(\mathbf{X}_{i,k} \times \mathbf{h} - \mathbf{X}_{j,k} \times \mathbf{h}) \rightarrow \min,$$

где i – индекс субъекта, k – номер класса жеста.

3.1. Схема обработки сигнала

После получения сигнала ЭМГ с датчиков проводится фильтрация в два этапа. На первом этапе применяется фильтр нижних частот (до 50 Гц) и фильтр высоких частот (более 1.5 МГц). Эти фильтры позволяют избавиться от шума, создаваемого электронным оборудованием и внешним статическим электрическим полем. Схема обработки сигнала показана на рис. 3.

Сигнал, зарегистрированный при мышечной активности человека, обрабатывается частотным фильтром, затем он пропускается через нейронную сеть, которая компенсирует шум в сигнале. На выходе модели получаем очищенный сигнал, который может быть использован в задаче классификации.

3.2. Наборы данных

При планировании эксперимента были рассмотрены две базы данных, содержащие данные ЭМГ, подходящие для построения информационной системы с управлением на основе жестов. Для эксперимента требовался набор данных, содержащий сигналы ЭМГ, полученные с области предплечья при совершении набора жестов кистью руки. Каждый из жестов может использоваться в качестве управляющего воздействия при работе с информационной системой.

3.2.1. Ninapro Data

Эта база данных общедоступна для академических целей на специальном веб-сайте¹ [24]. Цель проекта заключается в разработке семейства алгоритмов, способных значительно увеличить ловкость и сократить время обучения для управляемого протеза sEMG. Задача проекта – обеспечение пациентов дешевым, простым и естественным способом управления протезом.

Набор данных состоит из биоэлектрических мышечных активностей, собранных в специальных условиях с использованием дифференциальных электродов sEMG. На данный момент доступны данные по 67 здоровым субъектам и 11 субъектам с ампутированными конечностями.

Процесс сбора данных Ninapro был спланирован таким образом, чтобы его можно было легко повторить и получить новые данные различными исследовательскими группами.

3.2.2. RF-Lab. Лаборатория цифровой обработки сигналов (ЦОС) РТУ МИРЭА

База проекта содержит сигналы ЭМГ, считанные с области предплечья. В сборе данных участвовали 6 субъектов. Каждый субъект последовательно повторял одно из 9 движений кистью (жест) по 79 раз. Сигналы, полученные для каждого жеста, были записаны в вектор длиной в 400 отсчетов. Общее количество сигналов равно 2820 [9]. Набор данных включают жесты следующих классов:

- кисть вверх (класс 0);
- кисть вниз (класс 1);
- сжатие всех пальцев (класс 2);
- сжатие указательного пальца (класс 3);
- сжатие среднего пальца (класс 4);
- сжатие безымянного пальца (класс 5);
- щелчок большого пальца со средним (класс 6);
- разжимание всех пальцев (класс 7);
- поворот кисти влево (класс 8).

¹ <http://ninapro.hevs.ch/>. Дата обращения 15.06.2022. / Accessed June 15, 2022.

Для регистрации сигналов были использованы следующие комплектующие: Arduino Leonardo, ECG-EMG Arduino Shield, одноканальные поверхностные электроды и USB Type-A / USB Micro-B.

В результате использовались 79 векторов длиной 400 единиц для каждого жеста, что предоставляло собой окно, в котором зафиксирован потенциал действия. Таким образом, в него входят только наиболее важные данные, которые необходимы для задачи классификации, тем самым уменьшая потребляемые вычислительные ресурсы и увеличивая точность.

В рамках данной работы использовался набор данных RF-Lab² из-за его направленности на построение человеко-машинного интерфейса с управлением жестами.

3.3. Оценка качества фильтрации

Для оценки качества сигнала используется анализ среднеквадратического отклонения ЭМГ-сигнала в зависимости от субъекта. Для каждого типа движения рассчитывается значение среднеквадратического отклонения сигнала между всеми субъектами (рис. 4).

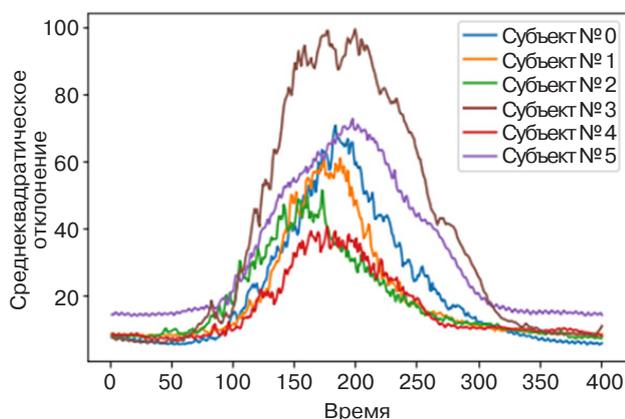


Рис. 4. Среднеквадратическое отклонение для классов жестов для каждого субъекта

При фильтрации сигнала нужно снизить среднеквадратическое отклонение ЭМГ-сигнала в рамках каждого класса жеста. В качестве примера было подсчитано среднеквадратическое отклонение для жеста класса 0 до и после фильтрации с использованием частотного фильтра (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что частотная фильтрация снижает среднеквадратическое отклонение сигнала на всем отрезке, поэтому для оценки эффективности фильтрации сигнала в нашем эксперименте используется данный метод.

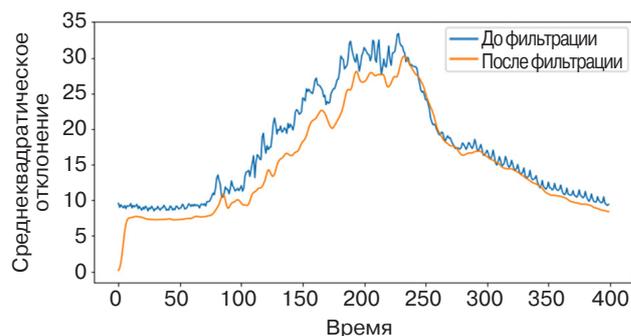


Рис. 5. Сравнение среднеквадратического отклонения амплитуды ЭМГ-сигнала до и после частотной фильтрации

4. РАЗРАБОТАННАЯ МОДЕЛЬ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Цифровые фильтры на сегодняшний день широко применяются в различных областях обработки сигналов, как технических, так и биологических, к которым относится ЭМГ-сигнал. Математические модели цифровых фильтров могут быть описаны с использованием векторов и числовых матриц. Для бинарного сигнала числа в матрицах могут быть двоичными. Существует два типа фильтров: с конечной импульсной характеристикой и с бесконечной импульсной характеристикой. Фильтр должен подавлять гармонические компоненты исходного сигнала в одной полосе частот (полоса подавления) и пропускать их в другой полосе частот (полоса пропускания). В большинстве случаев в крайне сложных задачах анализа сигналов для конструирования пространства признаков применяются классические приемы, основанные на преобразовании Фурье и вейвлет-преобразовании. Из-за сложности понимания природы сигнала признаки одной задачи могут абсолютно не подходить для другой задачи, и требуется с нуля конструировать пространство признаков. Сигнал ЭМГ попадает под категорию сигналов со сложной природой, для обработки которого не подходят стандартные фильтры. Он может быть представлен в виде временного ряда [25]. Поэтому для построения фильтра для сигнала ЭМГ может подойти использование интеллектуальных моделей. Одной из наиболее эффективных интеллектуальных моделей на данный момент являются нейронные сети.

Для решения задачи будем использовать тип нейронной сети, включающий слой свертки. Такие сети называются сверточными. В качестве активационной функции предлагается использовать функцию активации – параметризованный ReLU (PReLU). Применение данной функции активации является достижением в машинном зрении, позволившим

² <https://rf-lab.org/>. Дата обращения 01.06.2022. / Accessed June 01, 2022.

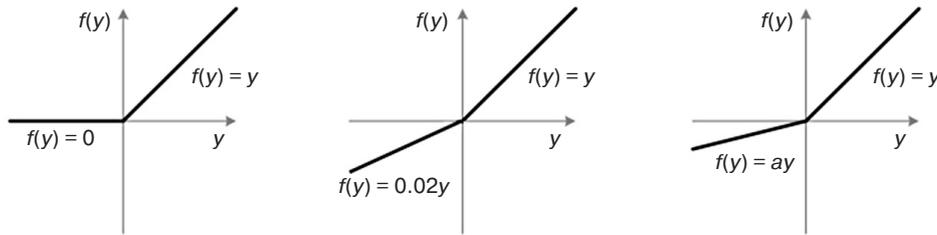


Рис. 6. Сравнение активационной функции ReLU (слева), LeakyReLU (в центре), PReLU (справа).
 a – параметр функции PReLU; y – значение входного сигнала

превзойти человеческий уровень в задачах распознавания изображений ImageNet³. Процесс обратного распространения ошибки и обновления для PReLU прост и похож на подобный процесс для традиционных ReLU. В отличие от ReLU функция PReLU не обнуляет отрицательные входные сигналы. Вместо этого отрицательные входные сигналы умножаются на некоторый ненулевой коэффициент, что позволяет учитывать отрицательные значения при обучении сети и обработке сигналов. Сравнение активационной функции PReLU с обычным ReLU продемонстрировано на рис. 6.

В рамках Kaggle-соревнования National Data Science Bowl функция активации PReLU позволила уменьшить переобучение благодаря элементу случайности в работе. При сравнении точности классификации двух сверточных искусственных нейронных сетей с различными функциями активации на наборах данных (изображений, используемых для тестирования качества алгоритмов распознавания образов) CIFAR-10, CIFAR-100⁴ и NDSB⁵ получены результаты, которые говорят о том, что для всех наборов модифицированные функции активации семейства ReLU превзошли традиционные функции. PReLU существенно превосходит другие функции активации на наборе данных NDSB, т.к. этот набор содержит меньше обучающих данных и функция активации позволяет избежать переобучения. Для обучения моделей машинного обучения применялись современные средства облачной инфраструктуры, такие как Docker⁶ и AmazonAzure⁷ [26].

Для проведения эксперимента использовался язык программирования Python 3.8 и библиотека Keras 2.9.0⁸ при построении модели нейронной сети. Разработанная

в ходе анализа архитектура нейронной сети для фильтрации сигнала ЭМГ представлена на рис. 7.

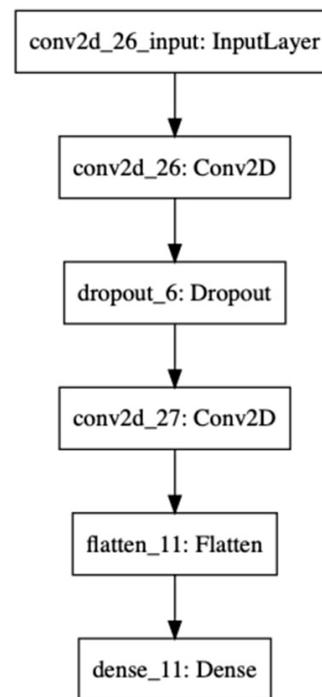


Рис. 7. Архитектура сверточной нейронной сети

Разработанная модель содержит два сверточных слоя. В качестве входных данных сети передается матрица размером 20×20 , представляющая собой необработанный сигнал ЭМГ, состоящий из 400 отсчетов. Первый слой содержит 64 карты признаков размером 5×5 и функцию активации PReLU (с параметром $a = 0.02$). Второй сверточный слой содержит 32 карты признаков размером 3×3 . Далее – слой выпрямления и полносвязный выходной слой размерностью 400, что соответствует размерности входного сигнала. Такая размерность на выходе сети позволяет использовать выходной сигнал наравне с входным, ожидая, что выходной сигнал сохранит полезную информацию о паттерне движения кисти субъекта. Для обучения модели использовались облачные вычислительные мощности MicrosoftAzure⁹ [26].

³ <https://www.image-net.org/>. Дата обращения 09.06.2022. / Accessed June 09, 2022.

⁴ <https://www.cs.toronto.edu/~kriz/cifar.html>. Дата обращения 10.06.2022. / Accessed June 10, 2022.

⁵ <https://www.kaggle.com/competitions/datasciencebowl/overview/about-the-ndsb>. Дата обращения 10.06.2022. / Accessed June 10, 2022.

⁶ <https://www.docker.com/>. Дата обращения 10.06.2022. / Accessed June 10, 2022.

⁷ <https://azure.microsoft.com/en-us>. Дата обращения 10.06.2022. / Accessed June 10, 2022.

⁸ <https://github.com/keras-team/keras/releases/tag/v2.9.0>. Дата обращения 10.06.2022. / Accessed June 10, 2022.

⁹ <https://azure.microsoft.com/en-us>. Дата обращения 01.06.2022. / Accessed June 01, 2022.

5. РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ И ОЦЕНКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для эксперимента был использован набор данных RF-Lab, собранный командой Лаборатории ЦОС РТУ МИРЭА [9]. Набор содержит данные одного канала ЭМГ-сигнала, полученного от 6 субъектов. Каждый субъект выполнял 9 различных жестов рукой.

5.1. Структура эксперимента

Для обучения нейронной сети набор данных был преобразован следующим образом. Во-первых, он был разделен на 3 части: обучающая, валидационная и тестовая выборки. Обучающая выборка составляла 60% от общего объема данных и включала данные четырех из шести субъектов. Валидационная выборка содержала 20% данных, включая данные тех же самых четырех субъектов. Тестовая выборка содержала оставшихся 20% от общего объема данных и включала в себя данные двух субъектов, не участвующих в обучении. Такой подход использовался для демонстрации пригодности полученной модели на данных от субъектов, которые модель не видела во время обучения. Каждый обучающий пример состоял из исходного сигнала в качестве входных данных и парного сигнала в качестве целевого значения. Парный (целевой) сигнал подбирался таким образом, чтобы он принадлежал другому субъекту. Обучение нейронной сети проводилось с применением алгоритма оптимизации Adam [27], количество эпох обучения было равно 25. В качестве функции ошибки использовалась среднеквадратичная функция потерь (mean squared error) [28].

5.2. Полученные результаты

После обучения полученную модель оценили на оставшихся двух субъектах из набора данных. Отдельно были проведены сравнения каждого

класса сигнала (типа движения кистью). В качестве показателя эффективности разработанной модели измерялось среднеквадратичное отклонение сигнала до фильтрации и после. Его значения до и после фильтрации показаны на рис. 8. Измерения проводились для сигналов каждого класса отдельно. Как видно из рисунка, наибольшее отклонение имеют сигналы для жестов с классом 6 (сжатие безымянного пальца) и 8 (разжимание всех пальцев).

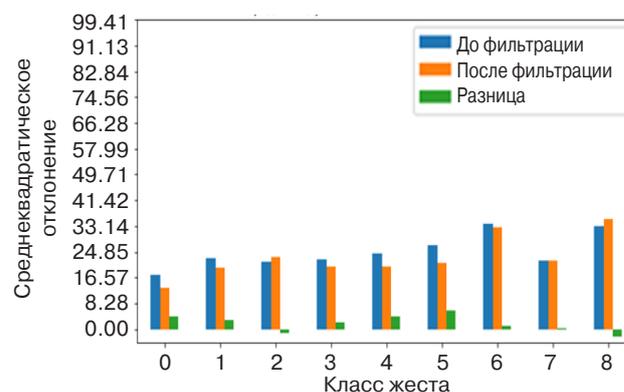


Рис. 8. Сравнение среднеквадратического отклонения ЭМГ-сигнала до и после нейросетевой фильтрации в зависимости от класса сигнала

В среднем снижение среднеквадратического отклонения составило 5% для сигналов, полученных при движении кистью. Наилучший результат был получен для движений с классом 4 и 5. Увеличение среднеквадратического отклонения зафиксировано для сигналов с классами 2 и 8. Снижение величины среднеквадратического отклонения было достигнуто для сигналов, относящихся к классам 0, 1, 3, 4, 5, 6, 7.

Полученные результаты позволяют говорить о возможности применения нейросетевой фильтрации в задачах очистки индивидуальных сигналов. Результат фильтрации для жеста класса 0 показан на рис. 9.

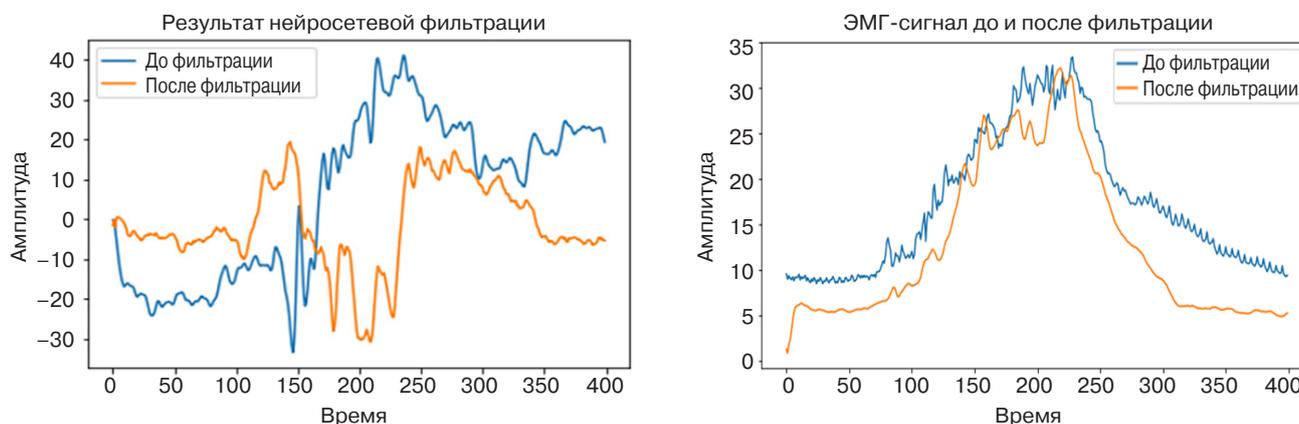


Рис. 9. Среднеквадратическое отклонение сигнала до и после нейросетевой фильтрации

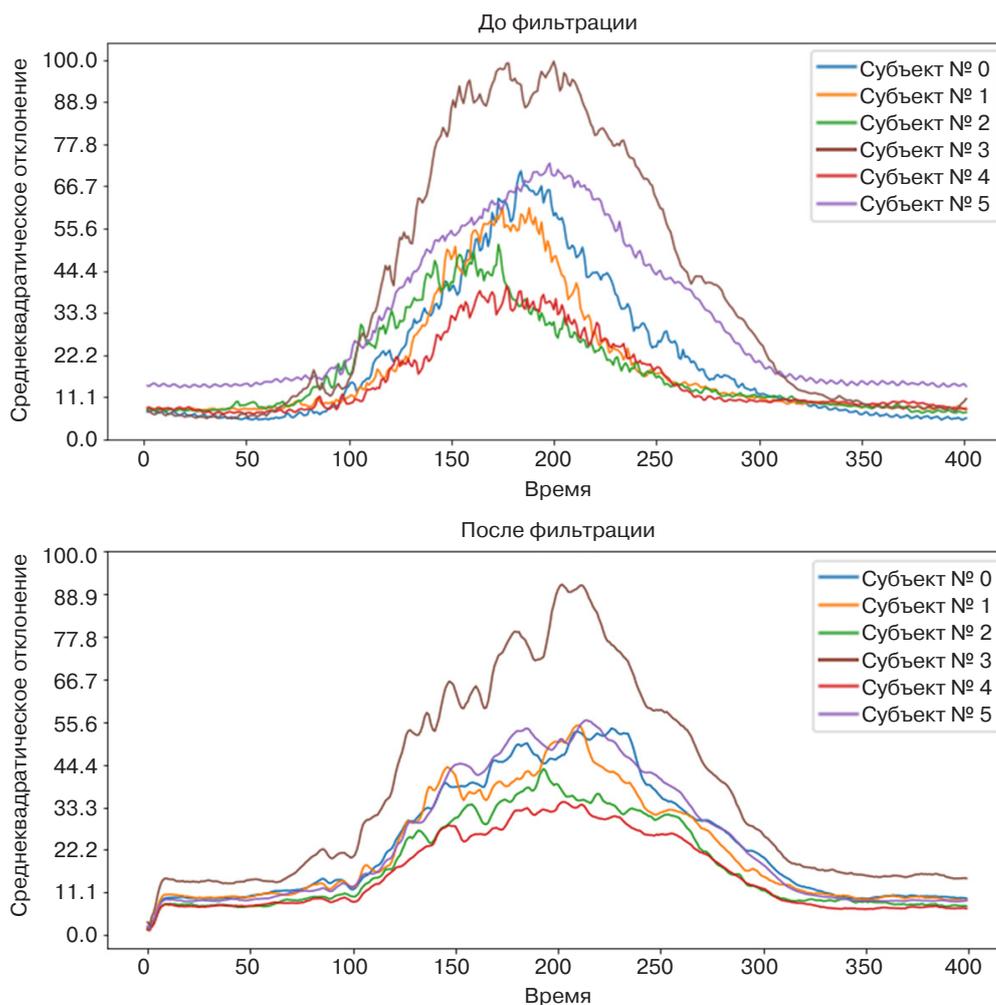


Рис. 10. Среднеквадратическое отклонение между разными жестами для каждого субъекта из выборки

Таблица 1. Сравнение результата фильтрации для разных классов сигнала

Класс сигнала	№ 0	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
Изменение величины среднеквадратического отклонения после фильтрации	3.93	3.1	-1.33	2.16	3.95	6.03	0.99	0.07	-2.41

Также проведено сравнение среднеквадратического отклонения между разными жестами для одного субъекта до и после фильтрации. Полученные данные показывают, что различие между жестами сохранилось почти на том же уровне (рис. 10).

Как видно из результатов, разработанная модель нейросетевой фильтрации способна компенсировать индивидуальные компоненты в сигнале ЭМГ. Достиженные показатели улучшения качества сигнала представлены в табл. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы проведено исследование подходов и методов к разработке нейросетевых фильтров для биологических сигналов. Предложена схема

фильтрации биологических сигналов с учетом наличия в сигнале индивидуальных компонентов. Разработана модель и проведено обучение сверточной нейронной сети для интеллектуальной фильтрации. В ходе исследования была найдена эффективная архитектура сверточной нейронной сети для фильтрации сигнала ЭМГ.

Эксперимент по фильтрации одноканального ЭМГ-сигнала показал эффективность предложенной модели. Нейросетевая фильтрация позволяет снизить влияние индивидуального шума в сигнале ЭМГ в среднем на 5%.

В дальнейших исследованиях планируется оценить влияние нейросетевой фильтрации на точность классификации жестов с использованием ЭМГ-сигнала.

Вклад авторов

А.В. Васильев – подготовка алгоритмов, сбор данных, проведение исследования, написание текста статьи.

А.О. Мельников – идея исследования, развитие целей и задач, формулировка выводов.

С.А. Лесько – консультации по вопросам проведения исследования, научное редактирование статьи.

Authors' contributions

A.V. Vasiliev – preparing algorithms, data collection, conducting research, and writing the text of the article.

A.O. Melnikov – the research idea, developing objectives and aims, and formulating conclusions.

S.A. Lesko – consultations on research issues, scientific editing of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Arruda L.M., Calado A., Boldt R.S., Yu.Y., Carvalho H., Carvalho M.A., Soares F., Matos D. Design and testing of a textile EMG sensor for prosthetic control. In: Garcia N.M., Rires I.M., Goleva R. (Eds.). *IoT Technologies for HealthCare: 6th EAI International Conference, HealthyIoT 2019. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*. Springer; 2020;341:37–51. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42029-1_3
2. Hu Y., Wang H., Sheikhejad O., Xiong Y., Gu H., Zhu P., Sun R., Wong C.P. Stretchable and printable medical dry electrode arrays on textile for electrophysiological monitoring. In: *IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*. 2019;243–248. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2019.00043>
3. Truong H., Zhang S., Muncuk U., Nguyen P., Bui N., Nguyen A., Dinh T.N., Vu T. CapBand: Battery-free successive capacitance sensing wristband for hand gesture recognition. In: *Proceedings of the 16th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '18)*. 2018;54–67. <https://doi.org/10.1145/3274783.3274854>
4. Goto D., Shiozawa N. Can textile electrode for ECG apply to EMG measurement? In: *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*. 2018;431–434. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9038-7_81
5. Samuel O.W., Asogbon M.G., Geng Y., Al-Timemy A.H., Pirbhulal S., Ji N., Chen S., Li G. Intelligent EMG pattern recognition control method for upper-limb multifunctional prostheses: advances, current challenges, and future prospects. *IEEE Access*. 2019;7:10150–10165. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2891350>
6. Raheema M.N., Hussain J.S., Al-Khazzar A.M. Design of an intelligent controller for myoelectric prostheses based on multilayer perceptron neural network. In: *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020;671(1):012064. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/671/1/012064>
7. Sosa M., Oviedo G., Fontana J.M., O'Brien R., Laciari E., Molisani L. Development of a serious game controlled by myoelectric signals. In: *The 8th Latin American Conference on Biomedical Engineering and The 42nd National Conference on Biomedical Engineering. CLAIB 2019. IFMBE Proceedings*. 2019;75:1171–1177. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30648-9_152
8. McIntosh J., Marzo A., Fraser M., Phillips C. EchoFlex: Hand gesture recognition using ultrasound imaging. In: *Proceedings of The 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. (CHI '17)*. 2017; 1923–1934. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025807>
9. Lukyanchikov A.I., Melnikov A.O., Lukyanchikov O.I. Algorithms for classification of a single channel EMG signal for human-computer interaction. In: *ITM Web of Conferences*. 2018;18:02001. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20181802001>
10. Tavakoli M., Benussi C., Lopes P.A., Osorio L.B., de Almeida A.T. Robust hand gesture recognition with a double channel surface EMG wearable armband and SVM classifier. *Biomed. Signal Process. Control*. 2018;46: 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2018.07.010>
11. Chen C., Ma S., Sheng X., Zhu X. Continuous estimation of grasp kinematics with real-time surface EMG decomposition. In: *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*. 2019;11744: 108–119. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27541-9_10
12. Wang Y., Wang C., Wang Z., Wang X., Li Y. Hand gesture recognition using sparse autoencoder-based deep neural network based on electromyography measurements. In: *Nano-, Bio-, Info-Tech Sensors, and 3D Systems II*. 2018;105971D:163–169. <https://doi.org/10.1117/12.2296382>
13. Qi J., Jiang G., Li G., Sun Y., Tao B. Surface EMG hand gesture recognition system based on PCA and GRNN. *Neural Comput. Appl.* 2020;32(10):6343–6351. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04142-8>
14. Cappellari P., Gaunt R., Beringer C., Mansouri M., Novelli M. Identifying electromyography sensor placement using dense neural networks. In: *Proceedings of The 7th International Conference on Data Science, Technology and Applications*. 2018:130–141. <http://dx.doi.org/10.5220/0006912501300141>
15. Pal K.K., Banerjee P., Choudhuri S., Sampat S. *Activity classification using Myo Gesture Control Armband data through machine learning*. 2019. Available from URL: https://kuntalkumpal.github.io/files/MC_Report.pdf
16. Noble W. What is a support vector machine? *Nat. Biotechnol.* 2006;24:1565–1567. <https://doi.org/10.1038/nbt1206-1565>
17. Breiman L. Random forests. *Machine learning*. 2001;45:5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
18. Wright R.E. Logistic regression. In: Grimm L.G., Yarnold P.R. (Eds.). *Reading and understanding multivariate statistics*. American Psychological Association; 1995. P. 217–244. <https://psycnet.apa.org/record/1995-97110-007>
19. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system. In: *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '16)*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery; 2016. P. 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>

20. Ke G., Meng Q., Finley T., Wang T., Chen W., Ma W., Ye Q., Liu T.Y. LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree. *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS 2017)*. Long Beach, CA, USA: 2017;30. Available from URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/file/6449f44a102fde848669bdd9eb6b76fa-Paper.pdf>
21. Sherstinsky A. Fundamentals of recurrent neural network (RNN) and long short-term memory (LSTM) network. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 2020 Mar. 1;404:132306. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2019.132306>
22. Shi X., Chen Z., Wang H., Yeung D.Y., Wong W.K., Woo W.C. Convolutional LSTM network: A machine learning approach for precipitation nowcasting. *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS 2015)*. 2015;28. Available from URL: <https://papers.nips.cc/paper/2015/hash/07563a3fe3bbe7e3ba84431ad9d055af-Abstract.html>
23. Chen C., Yu Y., Ma S., Sheng X., Lin C., Farina D., Zhu X. Hand gesture recognition based on motor unit spike trains decoded from high-density electromyography. *Biomed. Signal Process. Control*. 2020;55:101637. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.101637>
24. Atzori M., Müller H. The Ninapro database: A resource for sEMG naturally controlled robotic hand prosthetics. In: *2015 The 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. 2015:7151–7154. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2015.7320041>
25. 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> [Andrianova E.G., Golovin S.A., Zykov 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>]
26. Никонов В.В., Горчаков А.В. Тренировка моделей машинного обучения с использованием современных средств контейнеризации и облачной инфраструктуры. *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2021;6: 26–36. <https://doi.org/10.25791/asu.6.2021.1288> [Nikonov V.V., Gorchakov A.V. Train machine learning models using modern containerization and cloud Infrastructure. *Promyshlennye ASU i kontrolyery = Industrial Automated Control Systems and Controllers*. 2021;6:33–43 (in Russ.). <https://doi.org/10.25791/asu.6.2021.1288>]
27. Kingma D.P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization. *arXiv preprint arXiv:1412.6980*. 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>
28. Wang Z., Bovik A.C. Mean squared error: Love it or leave it? A new look at signal fidelity measures. In: *IEEE Signal Processing Magazine*. 2009;26(1):98–117. <https://doi.org/10.1109/MSP.2008.930649>

Об авторах

Васильев Антон Владимирович, аспирант 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: bysslaev@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 4562-5628, <https://orcid.org/0000-0001-6712-0072>

Мельников Алексей Олегович, 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: melnikov.aleksey@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-1980-2727>

Лесько Сергей Александрович, к.т.н., доцент, 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: sergey@testor.ru. Scopus Author ID 57189664364, <https://orcid.org/0000-0002-6641-1609>

About the authors

Anton V. Vasiliev, Postgraduate Student, Department of Applied Information Technologies, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bysslaev@gmail.com. RSCI SPIN-code 4562-5628, <https://orcid.org/0000-0001-6712-0072>

Alexey O. Melnikov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Applied Information Technologies, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: melnikov.aleksey@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-1980-2727>

Sergey A. Lesko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Applied Information Technologies, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sergey@testor.ru. Scopus Author ID 57189664364, <https://orcid.org/0000-0002-6641-1609>

УДК 311.21+681.7.06
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-20-32>



RESEARCH ARTICLE

Bibliometric analysis of holographic data storage literature

Kutty Kumar ^{1, @}, R. Parameswaran ²

¹ Library and Information Science, College of Veterinary Science, Sri Venkateswara Veterinary University, Proddatur-516360, India

² Central Library, Banaras Hindu University, Varanasi-221005, India

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

Abstract

Objectives. Snapshots of data can be stored in a holographic medium at varying depths. Data can be written via a spiral data channel in spinning holographic media in the form of circular disks like CDs or DVDs. This data is then read by shining a reference beam through the refraction following writing. However, holographic storage is distinct from CD/DVD media in the sense that information is encoded in all three dimensions. Two-dimensional data is written using a single laser beam that spirals around the material. Prototype holographic storage solutions use minuscule cones formed by individual snapshots or pages to store one million pixels. As compared with magnetic disks and tapes, which have a finite lifespan of 50 years at most, the longevity and dependability of optical media storage is advantageous for long-term archiving. Holographic technology allows for the portability of data-intensive media such as broadcast or high-definition video. However, the shelf life of holographic media remains low due to its sensitivity to light. The primary goals of most storage devices are more storage space and faster data transport. Holographic storage devices have the potential to outperform traditional optical storage devices both in terms of capacity and performance. The present paper aims to evaluate the current international research trends in Holographic Data Storage (HDS) and produce a graphical mapping of co-authorship and countries.

Methods. The major outputs of the dataset were authors, document type, publication, institution, nation, and citations. After exporting 1052 data sources, *HistCite* software was used to analyze the citations; visualization mapping was carried out using *VOSviewer* software and R programming language for the analysis of the author-country-title association on Holographic Storage Devices.

Results. The most prominent authors, papers, journals, organizations, and nations in the field of HDS were identified in *HistCite*. Then, four clusters were investigated using *VOSviewer* based on author keywords, citation collaboration networks among different organizations, countries, and the HDS co-authorship network.

Conclusions. During the study period from 2000–2020 (21 years), 4636 authors contributed to 1052 publications. The highest number of publications was in 2009, with a linear adjustment of $R^2 = 0.0136$. The most prolific author, Lee J., published 3.14% of the articles on this subject. In terms of country distribution, Japan took first-place ranking, claiming 16.54% of the total number of articles. The “holographic” keyword was used in 62.55% of the articles.

Keywords: holographic, data, storage, bibliometric, *HistCite*, *VOSviewer*

• Submitted: 22.09.2022 • Revised: 27.10.2022 • Accepted: 13.01.2023

For citation: Kumar K., Parameswaran R. Bibliometric analysis of holographic data storage literature. *Russ. Technol. J.* 2023;11(2):20–32. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-20-32>

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

The authors declare no conflicts of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Библиометрический анализ литературы по голографическому хранению данных

K. Kumar ^{1, @}, R. Parameswaran ²

¹ Кафедра библиотечно-информационных наук, Колледж ветеринарных наук, Ветеринарный университет Шри Венкатешвары, Проддатур-516360, Индия

² Центральная библиотека, Бенаресский индуистский университет, Варанаси-221005, Индия

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

Резюме

Цели. Моментальные снимки данных можно хранить на голографических носителях на различной глубине. Они могут быть записаны по спиральному каналу передачи данных на вращающиеся голографические носители в виде круглых дисков, похожих на CD или DVD. После записи данные можно считать через просвечивание опорным лучом при помощи рефракции. В отличие от CD/DVD носителей, в голографических запоминающих устройствах информация кодируется во всех трех измерениях. Двумерные данные записываются с помощью одного лазерного луча, который закручивается по спирали вокруг материала. Для того чтобы сохранить один миллион пикселей, прототипы решений для голографического хранения данных использовали крошечные конусы, образованные отдельными снимками данных или страницами. По сравнению с магнитными дисками и кассетами, срок службы которых ограничен максимум 50 годами, долговечность и надежность оптических носителей информации имеет явное преимущество при долгосрочном архивировании. Голографическая технология обеспечивает переносимость носителей с большим объемом данных, таких как телепрограммы или видео высокой четкости. Однако срок годности голографических носителей остается низким из-за их чувствительности к свету. Основными целями использования большинства устройств хранения данных являются увеличение объема памяти и более быстрая передача данных. Голографические запоминающие устройства потенциально могут превзойти традиционные оптические устройства как по емкости, так и по производительности. Цель настоящей работы – оценить актуальные международные тенденции исследований в области голографического хранения данных и составить графическое отображение соавторства и стран.

Методы. Для анализа была осуществлена выборка данных, в которую вошли авторы, тип, количество публикаций, учреждение, страна, количество и место цитирований. После экспорта 1052 источников данных для анализа цитат использовалось программное обеспечение *HistCite*; визуализация была выполнена с использованием программного обеспечения *VOSviewer* и языка программирования R для анализа ассоциации «автор – страна – название» о голографическом хранении данных.

Результаты. При помощи *HistCite* были определены наиболее значимые авторы, статьи, журналы, организации и страны в области голографического хранения данных. Затем, используя *VOSviewer*, мы исследовали четыре кластера, основанных на авторских ключевых словах, сетях сотрудничества по цитированию между различными организациями, странами, а также сетями соавторов, пишущих о голографическом хранении данных.

Выводы. За период исследования с 2000 по 2020 гг. (21 год) 4636 авторов написали 1052 публикации. Наибольшее количество публикаций было издано в 2009 г. с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.0136$. Наиболее продуктивный автор, Джей Ли, опубликовал 3.14% статей по голографическому хранению данных. С точки зрения распространения по странам первое место в рейтинге заняла Япония с 16.54% от общего количества статей. Ключевое слово «голографический» использовалось в 62.55% статей.

Ключевые слова: голографический, данные, хранилище, библиометрический, *HistCite*, *VOSviewer*

• Поступила: 22.09.2022 • Доработана: 27.10.2022 • Принята к опубликованию: 13.01.2023

Для цитирования: Kumar K., Parameswaran R. Bibliometric analysis of holographic data storage literature. *Russ. Technol. J.* 2023;11(2):20–32. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-20-32>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Since the advent of the digital age, the wealth of knowledge available to the general public has grown exponentially. This shift has been largely due to declining data storage costs and the increasing storage capacities of smaller devices. Although capable of satisfying current storage needs, the data storage industry will need to invest in new technologies if it wants to keep up with rising demand. Magnetic and classical optical data storage technologies store bits of information as individual magnetic or optical changes on a recording media. However, both approaches are starting to reach physical limits beyond which it becomes impossible to encode and thus store individual bits. A novel and promising high-capacity option is optical data storage that is distributed through the bulk of a medium as opposed to being limited to its two-dimensional surface. Significant progress toward practical utilization of holographic data storage (HDS) technology due to the recent emergence of cheaper supporting technologies and major findings from various research initiatives, which has generated conceptual breakthroughs [1]. The high density of holographic 3D memories is obtained by superimposing numerous holograms inside the same volume of the recording material. Thus, data storage across three dimensions becomes a practical option for next-generation memory storage [2]. Given the expected development of such systems at a comparable cost with current technology, along with the optimization and standardization of storage media, HDS could one day overtake magnetic and traditional optical data storage solutions as the industry standard for high-capacity data storage [3]. A comparable HDS system can store the equivalent of data from over 1000 CDs, as well as offering benefits over and above those of a traditional storage system. Based on the research collated here, HDS represents a novel three-dimensional data storage system offering significant advantages over conventional read/write memory systems. Some fundamental characteristics of HDS will be discussed along with an examination of potential uses for HDS in modern computing systems. Since the primary focus of this paper is to examine the current state of HDS research around the world, we present a visualization network map to show relationships between authors and their home

countries, along with their most frequently used terms, as well as referenced sources and the authors who most frequently cited them.

Brief introduction to holographic data storage

Holographic data storage comprises a high-volume data storage technology that creates holograms of each data instance. Like traditional optical storage devices, it stores high volumes of data in single volume also called 3D Storage [4]. Both write-once and rewriteable holographic media are possible (changes are reversible), the latter using crystal photorefractive impact. The memory architecture is comprised of a blue-green argon laser, beam splitters, reflectors, LCD board, lenses, lithium-niobite crystal, and a charge-coupled device camera. The blue-green argon laser shaft splits into two beams: a signal beam, which goes straight ahead, and a reference beam, which is controlled by a beam splitter. LCD screens reflect signals into lithium-niobite crystals. The reference beam showed crystal from a new angle. When the two beams meet, the signal beam would hologram information [1, 5, 6].

Uses of HDS

Data mining: HDS can be used to identify patterns more rapidly. Large databases with hidden patterns benefit from data mining. However, data mining on PCs places a heavy burden on data storage systems, whereas holographic memory could speed up data mining by improving access and storage [7].

Petaflop operations: a computer's processing speed with HDS is 1000 trillion floating point operations/s. Holographic memory frameworks speed up data access. Holographic memory can handle massive data requirements and be used instead of 10ns DRAM, hard drives, CD ROMs, and rock-mounted petabytes of storage [8].

Benefits of HDS

One terabyte can be stored in holographic memory. Unlike the fastest hard disk, which typically offer data access times of 5–10 ms, data recovery takes place in the microsecond range. For example, HDS can transport

Table 1. HistCite indicators

Ser. No.	Indicator	Definition
1	TLCS/TGCS	All records from an author, source, or other category, or all records, have a total score. TLCS = Total Local Citation Scores. TGCS = Total Global Citation Scores
2	Recs	The number of records where a given item is found is shown in the “number of records” column
3	LCS	The number of citations to work within the collection is represented in the Local Citation Score
4	GCS	The Global Citation Score shows all Web of Science Core Collection citations
5	LCR	Local Cited References shows a paper’s reference list’s number of collection-wide citations

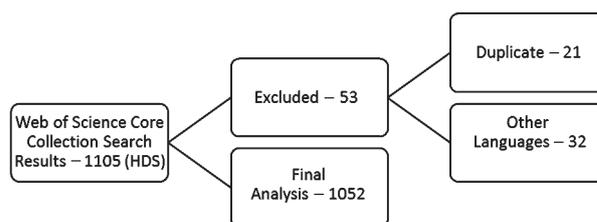
a film in under a minute and two pages can be compared optically in holographic capacity without data recovery. HDS is also motionless. Thus, mechanical constraints like erosion can be removed [2]. Another advantage of HDS is the ability to recover data from damaged media.

A variety of research frameworks have been proposed for HDS [9, 10]. Various linked applications of HDS analyzed by researchers include digital holograms [11], deep learning [12, 13] modulation code [14], digital watermarking [15], convolutional neural networks [16], and data compression methods [17]. Other research sets out to explore such aspects of HDS as fundamental issues [18], holographic memory [19], and bit error prediction [20], as well as focusing on holographic grating [21], fluid dynamics [22], and optical storage [23]. To the best of the present authors’ knowledge, there is no published bibliometric analysis of the holographic data storage literature. As a result, the purpose of the present work is to present a comprehensive bibliometric analysis of HDS studies, indicating current research trends by emphasizing significant research contributions. Our analysis is based on publishing data, citation distributions and statistics, regional and institutional productivity, research topics, impact journals, and keyword frequency. This work will pave the way for future HDS research by outlining research gaps and obstacles in extended storage.

METHODOLOGY

On June 17, 2021, the Web of Science core collection database was accessed alongside a comprehensive web search using the phrases “holographic data storage”, “high capacity”, “magnetic and optical data storage systems”¹. The dataset was refined by document type, language, and duplication criteria. Authors, document type, publication, institution, nation, and citations were the major outputs of the dataset. After extracting data from

1052 sources, we used *HistCite*² to examine references, *VOSviewer* software³ to create maps for analysis, and the R programming language to examine the connections between authors, nations, and titles in the Holographic archive. A visualization mapping was produced on the basis of co-authorship country, co-occurrence author keywords, and co-citation cited sources. The process of selecting publications is depicted in Fig. 1.

**Fig. 1.** Holographic data storage publications

Indicators in *HistCite*

The *HistCite* program is used in historiography analysis to organize bibliographic collections obtained by querying the Web of Science’s Science Citation Index (WoS). It presents a visual display of the most influential publications on a subject chronology, as well as the evolution of articles, authors, and journals. The current contribution is based on version 12.3. Table 1 lists the *HistCite* indicators [24] employed in this study.

RESULTS

Over the previous 20 years, the number of published papers related to HDS has increased worldwide as shown in Fig. 2. The highest number of publications was 8.56% in 2009; the largest number of worldwide

² Garfield E. *HistCite*®. *Bibliographic Analysis and Visualization Software*. <https://garfield.library.upenn.edu/histcomp/>. Accessed July 05, 2021.

³ Van Eck N.J., Waltman L. *VOSviewer*. (*Visualizing Scientific Landscapes*). 2010. <https://www.vosviewer.com>. Accessed October 06, 2021.

¹ Clarivate. Web of Science Core Collection. Web of Science Group. 2021. <https://clarivate.com/webofsciencelibrary/solutions/web-of-science-core-collection/>. Accessed July 05, 2021.

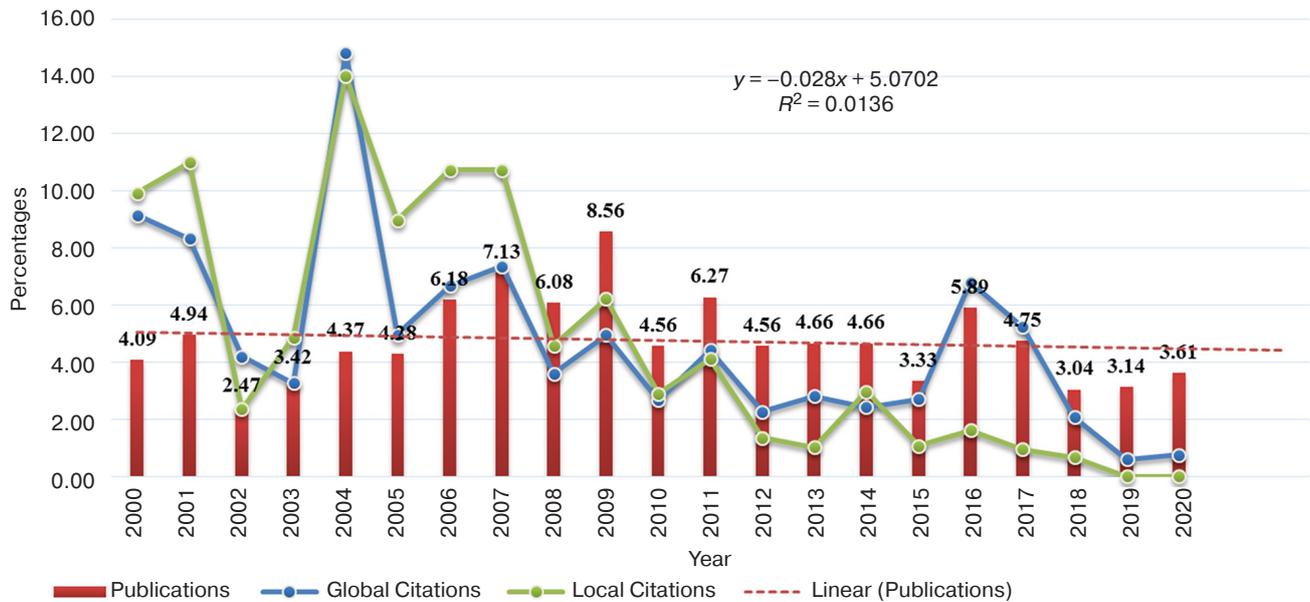


Fig. 2. Growth of HDS publications with citations

citations (14.82%) and local citations (14.03%) occurred in 2004. A linear adjustment of the observed variables $R^2 = 0.0136$ yielded a percentage of average years from the publication of 11.2%, average citations per document of 16.59%, and average citations per year of 1.49%.

As can be seen in Table 2, the 1052 publications had a total of 2236 authors. There were 51 single-authored works and 2185 collaborative works. The most cited author, Lee J., has 33 records (3.14%), a total citation score of 16, and a total citation score of 180 from all over the world. There were two researchers with the highest overall local citation scores: Jin G.F. (29 records, 2.76%) and Yang H. (27 records, 2.57%); their global citation totals were 28 and 260, respectively.

The authorship-collaboration network generated by *VOSviewer* is depicted in Fig. 3. Minimum documents

with five authors were chosen for the co-authorship graph approach; of those, 157 met the criteria. A total of 17 authors are evenly distributed throughout four groups (red, green, blue, and yellow). Tan X. has 13 links, 61 total link strength, and 20 documents, making up the majority of cluster-1 co-authorship patterns.

Figure 4 depicts a Sankey diagram of the Authors (left) between Countries (middle) and Titles (right) relationship in HDS literature. The study revealed which titles HDC authors had published most frequently, along with the specific HDS research areas (keywords). An analysis of top authors, titles, and keywords reveal that three authors Lin S.H., Belendez A., and Gallego S., representing the three nations Japan, China, and the United States, had a strong association with the HDS research keywords “holographic”, “storage”, and “data”.

Table 2. Highly productive ten authors on HDS

Ranking	Author	Reccs	%	TLCS	TGCS
1	Lee J.	33	3.14	16	180
2	Jin G.F.	29	2.76	28	260
3	Yang H.	27	2.57	4	11
4	Tan X.D.	26	2.47	104	734
5	He Q.S.	25	2.38	25	205
6	Pascual I.	24	2.28	71	387
7	Belendez A.	22	2.09	71	392
8	Cao L.C.	22	2.09	25	210
9	Sheridan J.T.	22	2.09	78	798
10	Ishii N.	20	1.90	10	80

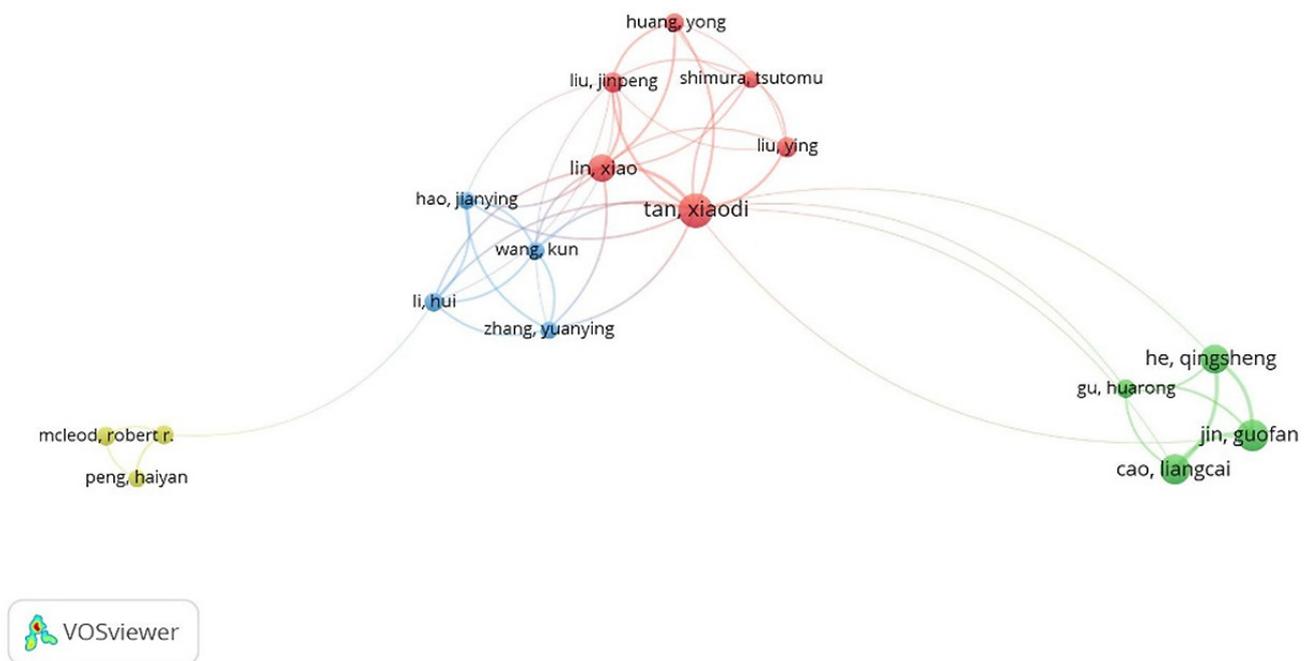


Fig. 3. Co-Authorship network of HDS

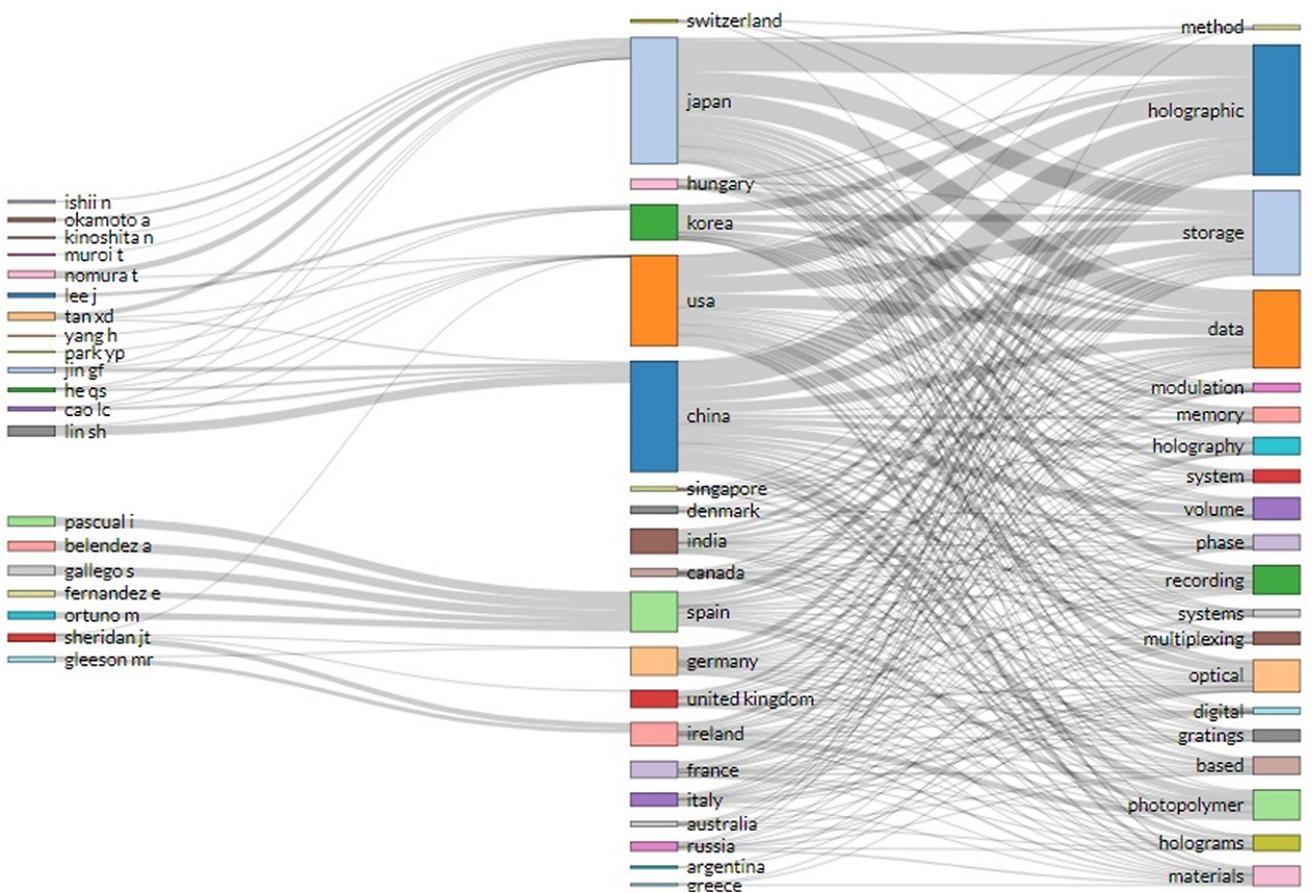


Fig. 4. Sankey diagram displaying the connection between authors (left), countries (center), and titles (right)

Table 3. Distribution of HDS document types

Ser. No.	Document type	Reccs	%	TLCS	TGCS
1	Article	960	91.25	1226	13160
2	Proceedings Paper	60	5.70	134	1668
3	Review	27	2.57	100	2460
4	Editorial Material	2	0.19	5	22
5	Review; Book Chapter	2	0.19	2	64
6	News Item	1	0.10	16	79

Table 4. Distribution of HDS records by country

Ranking	Country	Reccs	%	TLCS	TGCS
1	Japan	174	16.54	382	3528
2	USA	123	11.69	401	4735
3	China	96	9.13	87	2530
4	Germany	51	4.85	120	2538
5	South Korea	38	3.61	55	789
6	Ireland	31	2.95	108	1169
7	Spain	28	2.66	81	1207
8	UK	27	2.57	67	1431
9	Taiwan	23	2.19	106	548
10	Canada	18	1.71	31	1074

According to Table 3, HDS documents are broken down into six distinct article types, with journals making up the vast majority (91.25%). In total, 1226 HDS documents have a local citation score, while the total number of HDS documents having a global citation score is 13160. There are a total of 16 citations in the local area, and 79 citations in the global arena, making this item the one with the lowest citation score.

HDS publications featured contributions by researchers from 40 different countries. Table 4 covers all countries that contribute to the effectiveness of HDS research publications. Japan tops the list with 174 (16.54%) publications, 382 total local citation scores, and 3528 total global citation scores. It is followed by the United States in second place with 123 (11.69%), 401 total local citation scores, and a total global citation score of 4735, while China is in third place with 96 (9.13%), a total local citation score of 87, and a total global citation score of 2530.

Figure 5 depicts a citation of the countries network graph created using the full counting approach and a minimum of five countries' papers. Only 27 of the 50 countries fit the criteria. Six clusters grouped 26 countries

as follows: Cluster 1 (red color, 8 countries)—Belgium, Canada, Denmark, England, Latvia, Netherlands, Poland, and Russia; Cluster 2 (green color, 6 countries)—Bulgaria, Germany, Ireland, Italy, Spain, and Ukraine; Cluster 3 (blue color, 5 countries)—Australia, South Korea, Switzerland, Türkiye, and USA; Cluster 4 (yellow color, 3 countries)—Hungary, India, and Japan; Cluster 5 (purple color, 3 countries)—France, China, and Singapore; Cluster 6 (light blue color, 1 country)—Taiwan.

Overall, 1343 different keywords were used by researchers who contributed to 42 different HDS research publications. Table 5 has 658 (62.55%) documents, the majority of which are holographic studies; the total local citation score for these records is 1031; the total global citation score for these records was 7717; the last position is held by 'System' with 96 (9.13%) records, which have a local score of 130 and a global score of 740. The number of occurrences of the minimum set of five keywords is shown in Fig. 6. In Cluster 7 (orange), the term "Holographic Data Storage" appeared 105 times, was linked 30 times, and had an average link strength of 76.

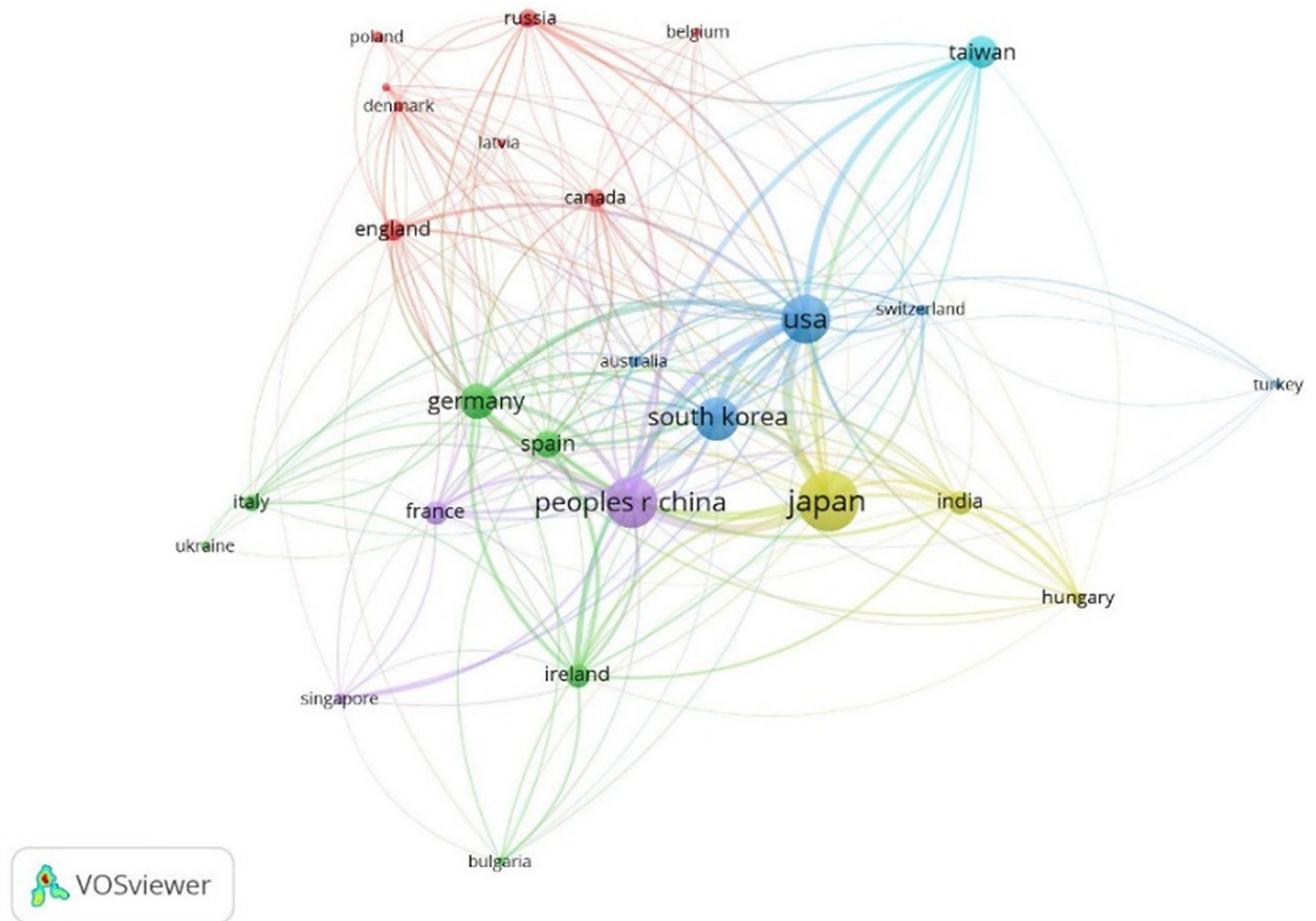


Fig. 5. Citation from different countries on HDS research

Table 5. Predominant author keyword in HDS research

Ranking	Word	Recs	%	TLCS	TGCS
1	Holographic	658	62.55	1031	7717
2	Storage	428	40.68	866	5501
3	Data	397	37.74	775	4722
4	Optical	139	13.21	206	2765
5	Recording	129	12.26	176	1364
6	Using	114	10.84	135	1231
7	Based	104	9.89	113	1763
8	Photopolymer	102	9.70	285	2030
9	Phase	101	9.60	159	1246
10	System	96	9.13	130	740

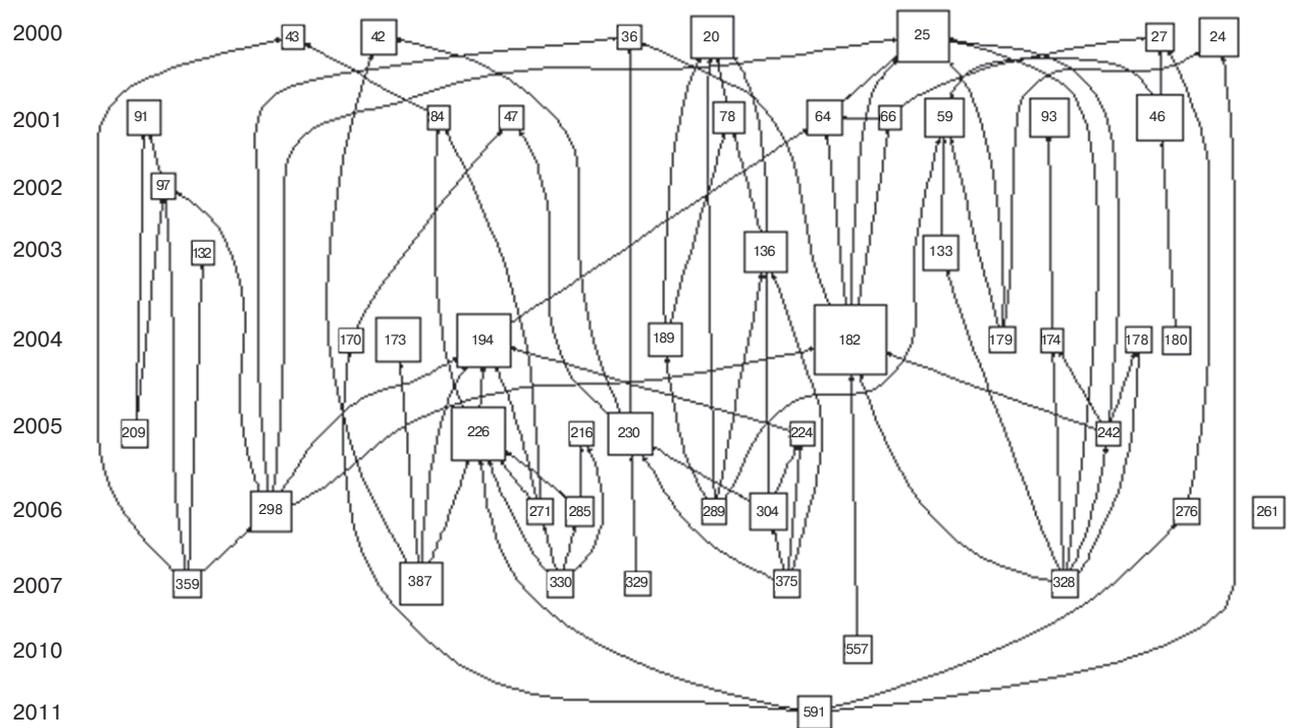


Fig. 8. Total local citation score mapping for HDS

Table 8. Top five citations in HDS

Record	Author	Title	Source	Year	DOI	LCS	GCS
182	Hesselink L., Orlov S.S., Bashaw M.C.	Holographic data storage systems	Proceedings of the IEEE	2004	http://doi.org/10.1109/JPROC.2004.831212	62	258
194	Orlov S.S., Phillips W., Bjornson E., Takashima Y., Sundaram P., Hesselink L., Okas R., Kwan D., Snyder R.	High-transfer-rate high-capacity holographic disk data-storage system	Applied Optics	2004	http://doi.org/10.1364/AO.43.004902	36	135
226	Horimai H., Tan X.D., Li J.	Collinear holography	Applied Optics	2005	http://doi.org/10.1364/AO.44.002575	36	221
25	Ashley J., Bernal M.P., Burr G.W., Coufal H., Guenther H., Hoffnagle J.A., Jefferson C.M., Marcus B., Macfarlane R.M., Shelby R.M., Sincerbox G.T.	Holographic data storage	IBM Journal of Research and Development	2000	http://doi.org/10.1147/rd.443.0341	33	219
46	Lawrence J.R., O’Neill F.T., Sheridan J.T.	Photopolymer holographic recording material	Optik	2001	http://doi.org/10.1078/0030-4026-00091	27	186

The present research employed Local Cited References (LCR), which displays the number of citations in a paper’s reference list to other papers in the collection, to predict where the field of holographic data storage is headed. Article rankings according to LCR are displayed in Table 9. A good example is the 26 articles cited by “Holographic polymer materials

with diffusion development: principles, arrangement, investigation, and applications” by A.V. Veniaminov and U.V. Mahilny. This suggests that articles using similar data are both highly relevant to the topic and likely to be current articles; moreover, in recent years there have been numerous publications on the topic, resulting in more frequent mentions.

Table 9. Top future direction articles in HDS

Ranking	Record	Author	Title	Source	Year	DOI	LCR
1	750	Veniaminov A.V., Mahilny U.V.	Holographic polymer materials with diffusion development: principles, arrangement, investigation, and applications	Optics and Spectroscopy	2013	http://doi.org/10.1134/S0030400X13120199	26
2	524	Das B., Joseph J., Singh K.	Phase-image-based sparse-gray-level data pages for holographic data storage	Applied Optics	2009	http://doi.org/10.1364/AO.48.005240	19
3	939	Nobukawa T., Barada D., Nomura T., Fukuda T.	Orthogonal polarization encoding for reduction of interpixel cross talk in holographic data storage	Optics Express	2017	http://doi.org/10.1364/OE.25.022425	17
4	921	Malallah R., Li H.Y., Kelly D.P., Healy J.J., Sheridan J.T.	A review of hologram storage and self-written waveguides formation in photopolymer media	Polymers	2017	http://doi.org/10.3390/polym9080337	16
5	591	Bruder F.K., Hagen R., Rolle T., Weiser M.S., Facke T.	From the surface to volume: concepts for the next generation of optical-holographic data-storage materials	Angewandte Chemie-International Edition	2011	http://doi.org/10.1002/anie.201002085	15

CONCLUSIONS

The present article contributes to an understanding of the HDS literature by grouping publications into clusters and identifying new research streams. Using *HistCite*, the study reveals the most prominent authors, papers, journals, organizations, and nations in the field of HDS. Then, using *VOSviewer*, we investigated four clusters based on author keywords, citation collaboration networks among different organizations, countries, and the co-authorship network of HDS. Further, the relationship between authors, countries and titles on HDS literature was established using the R programming language. Finally, the study analyzed the Total Local Citation Score Mapping for HDS, Top 5 citations and subjects of future research on HDS using *HistCite* software. HDS is a new concept that has become a big phenomenon in today's digital world. The most significant issue in the study was that during citation mapping and cluster analysis, only publications having a minimum of seven and a maximum of sixty-two citations were included. Regardless of their proportional contribution, recent papers could not demonstrate their true potential in this manner. Since more than 4.75% of the publications in this study (50 of 1052) were published within the last decade (2000–2011), the bibliometric analysis should be carried out again in the future to recognize new structures having made a mark in the field. Second, non-WoS source databases are not supported by *HistCite*. As a result, this investigation concentrated entirely on WoS publications, yielding articles from respected journals. As a result, there may be a bias against non-WoS journal papers and high-quality publications may present information not found in our study that may sway HDS opinions. It is feasible

that future bibliometric software will be created to permit the inclusion of smaller journal publications. Using bibliometric meta-analyses, researchers will be able to compare the construct influences in WoS and non-WoS works, as well as applying them to a wider range of fields.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

All authors approved the final text of the manuscript for publication.

REFERENCES

- Ashley J., Bernal M.P., Burr G.W., Coufal H., Guenther H., Hoffnagle J.A., et al. Holographic data storage technology. *IBM J. Res. Dev.* 2000;44(3): 341–368. <https://doi.org/10.1147/rd.443.0341>
- Psaltis D., Burr G.W. Holographic data storage. *Computer.* 1998;31(2):52–60. <https://doi.org/10.1109/2.652917>
- Azami M., Farha T.A., Taj A.S., Punitha B. Holographic mass storage system. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*. 2019;6(9):47–49. Available from URL: <https://jetir.org/papers/JETIRDD06009.pdf>
- Leith E.N., Kozma A., Upatnieks J., Marks J., Massey N. Holographic data storage in three-dimensional media. *Appl. Opt.* 1966;5(8):1303–1311.
- Burr G.W., Coufal H., Hoffnagle J.A., Michael C., Jurich M., Macfarlane R.M., et al. High-density and high-capacity holographic data storage. *Asian Journal of Physics, Special Issue on Optical Information Technology*. 2001;10(1):28 p. Available from URL: http://geoffreyburr.org/papers/ajp_review.pdf
- Timucin D.A., Downie J.D. Holographic optical data storage. *IEEE Potentials.* 2000;19(4):32–36. <https://doi.org/10.1109/45.877865>
- Nakamura Y. Magnetic holography and its application to data storage. *Photonics.* 2021;8(6):187. <https://doi.org/10.3390/photonics8060187>

8. Ebisuzaki T., Germain R., Taiji M. PetaFLOPS computing. *Commun. ACM*. 2004;47(11):42–45. <https://doi.org/10.1145/1029496.1029524>
9. Hesselink L., Orlov S.S., Bashaw M.C. Holographic data storage systems. In: *Proc. IEEE*. 2004;92(8):1231–1280. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2004.831212>
10. Daiya K., Chouhan B., Rathi P. Holographic data storage. *Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT)*. 2014;2(10):179–182. Available from URL: <https://www.ijert.org/research/holographic-data-storage-IJERTCONV2IS10050.pdf>
11. Cheremkhin P.A., Kurbatova E.A. Optical dynamic reconstruction of quantized digital and computer-generated holograms. In: *2018 International Conference Laser Optics (ICLO)*. St. Petersburg: IEEE; 2018. P. 203–203. <https://doi.org/10.1109/LO.2018.8435412>
12. Ko H., Kim H.Y. Deep learning-based compression for phase-only hologram. *IEEE Access*. 2021;9:79735–79751. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3084800>
13. Kim E., Park S., Hwang S., Moon I., Javidi B. Deep learning-based phenotypic assessment of red cell storage lesions for safe transfusions. *IEEE J. Biomed. Health Inform.* 2022;26(3):1318–1328. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2021.3104650>
14. Nguyen C.D., Xuan Pham N., Duong C.C., Cong Nguyen L. Multilevel modulation coding for four-level holographic data storage systems. In: *2020 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*. IEEE; 2020. P. 30–34. <https://doi.org/10.1109/ATC50776.2020.9255459>
15. Qiu S., Yuan H., Zhu G., Dai D., Xu H., Zhang X.F. Network privacy information storage model based on holographic digital watermarking technology. In: *2021 6th International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA)*. IEEE; 2021. P. 392–396. Available from URL: <https://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/ICSGEA53208.2021.00095>
16. Katano Y., Muroi T., Kinoshita N., Ishii N. Demodulation of multi-level data using convolutional neural network in holographic data storage. In: *2018 Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)*. IEEE; 2018. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/DICTA.2018.8615863>
17. Youssef A., Heshmat S. 3D holographic compression methods for real time applications. In: *2018 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*. IEEE; 2018. P. 136–139. <https://doi.org/10.1109/ITCE.2018.8316612>
18. Hesselink L. Fundamental issues related to digital holographic data storage. In: *1999 IEEE LEOS Annual Meeting Conference Proceedings. LEOS'99. 12th Annual Meeting*. IEEE Lasers and Electro-Optics Society 1999 Annual Meeting (Cat No99CH37009). IEEE; 1999. P. 327–328. <https://doi.org/10.1109/LEOS.1999.813615>
19. Tien-Hsin Chao. Compact digital holographic memory using blue diode laser. In: *Symposium Non-Volatile Memory Technology 2005*. IEEE; 2005 P. 72–74. <https://doi.org/10.1109/NVMT.2005.1541403>
20. Trelewicz J.Q., Cochran D. Bit error prediction for digital image data. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP '98 (Cat No98CH36181)*. IEEE; 1998. P. 2645–2648. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.1998.678066>
21. Sreebha A.B., Suresh S., Sreekala C.O., Pillai V.P.M. Volume holographic gratings in acrylamide-based photopolymer to provide selective light as an added input for improving the performance of dye-sensitized solar cells. *Curr. Sci.* 2018;114(11):2267–2272. Available from URL: <https://www.currentscience.ac.in/Volumes/114/11/2267.pdf>
22. Orlov S.S., Abarzhi S.I., Oh S.B., Barbastathis G., Sreenivasan K.R. High-performance holographic technologies for fluid-dynamics experiments. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2010;368(1916):1705–1737. Available from URL: <http://www.jstor.org/stable/25663339>
23. Tchalakov I. The history of holographic optical storage at the both sides of the iron curtain—1969–1989. *The Journal of the International Committee for the History of Technology (ICON)*. 2005;11:95–119. Available from URL: <http://www.jstor.org/stable/23787025>
24. Barreiro E.W. *Using HistCite software to identify significant articles in subject searches of the Web of Science*. ArXiv151207069 Cs [Internet]. 2015 Dec 22 [cited 2021 Jul 5]; Available from URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1512/1512.07069.pdf>

About the authors

Kutty Kumar, PhD, Assistant Professor, Department of Library and Information Science, College of Veterinary Science, Sri Venkateswara Veterinary University (New Building, Gopavaram Village, Korapadu Road, Proddatur-516360, Andhra Pradesh, India). E-mail: kumarkkutty@gmail.com. Scopus Author ID 55040539500, <https://orcid.org/0000-0002-3510-5924>

R. Parameswaran, PhD, Deputy Librarian, Central Library, Banaras Hindu University (Ajagara, Varanasi, Uttar Pradesh, 221005 India). E-mail: parameswaranblu@gmail.com. Scopus Author ID 56009308100, <https://orcid.org/0000-0001-5799-1472>

Об авторах

K. Kumar, PhD, доцент кафедры библиотечно-информационных наук, Колледж ветеринарных наук, Ветеринарный университет Шри Венкатешвары (Проддатур, штат Андхра Прадеш, 516360 Индия). E-mail: kumarkkutty@gmail.com. Scopus Author ID 55040539500, <https://orcid.org/0000-0002-3510-5924>

R. Parameswaran, PhD, заместитель библиотекаря, Центральная библиотека, Бенаресский индуистский университет (Аджара, Варанаси, штат Уттар Прадеш, 221005 Индия). E-mail: parameswaranblu@gmail.com. Scopus Author ID 56009308100, <https://orcid.org/0000-0001-5799-1472>

The text was submitted by the authors in English

Edited for English language and spelling by Thomas A. Beavitt

УДК 004.652
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-33-49>



ОБЗОР

Модели и методы анализа сложных сетей и социальных сетевых структур

Ю.П. Перова[@], В.Р. Григорьев, Д.О. Жуков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Целью статьи является исследование современных моделей и методов анализа сложных социальных сетевых структур и применяемых для этого инструментов, как на основе готовых решений в виде сервисов и программного обеспечения, так и средств разработки собственных приложений с использованием языка программирования Python. Такие исследования позволяют прогнозировать не только динамику общественных процессов (изменение социальных настроений), но и тенденции социально-экономического развития за счет мониторинга мнений пользователей по важным экономическим и социальным вопросам на уровне отдельных территориальных образований (районов, поселений небольших городов и т.д.) и регионов.

Методы. Рассмотрены и подробно описаны динамические модели и методы анализа стохастической динамики изменения состояний, учитывающие процессы самоорганизации и наличие памяти; методы деанонимизации пользователей; рекомендательные системы; статистические исследования, использующие методы анализа профилей в социальных сетях; методы численного моделирования для анализа сложных сетей и протекающих в них процессов. Особое внимание уделено обработке данных в сложных сетевых структурах средствами языка Python и применению его библиотек.

Результаты. Описана специфика решаемых задач при исследовании сложных сетевых структур и их междисциплинарность, связанная с использованием методов системного анализа, теории сложных сетей, текстовой аналитики и компьютерной лингвистики. В частности, исследованы динамические модели процессов, наблюдаемых в сложных социальных сетевых системах, структурные характеристики таких сетей и их взаимосвязь с наблюдаемыми динамическими процессами, в т.ч., с использованием теории построения динамических графов. Исследовано применение нейронных сетей для прогнозирования эволюции динамических процессов, наблюдаемых в сложных социальных системах, и их структуры. Значительное внимание уделено применению методов компьютерной лингвистики, что необходимо для извлечения знаний из текстовых сообщений пользователей социальных сетей при создании моделей, описывающих наблюдаемые процессы.

Выводы. Сетевой анализ помогает структурировать модели взаимодействия между социальными единицами: людьми, коллективами, организациями и т.д. По сравнению с другими методами сетевой подход имеет одно неоспоримое преимущество: он позволяет оперировать данными на разных уровнях исследования – от микро- до макроуровня, обеспечивает преимущество этих данных. Установлено, что практически все исследования используют методы работы с текстом, т.к. общение в социальных сетях почти полностью состоит из текстовых сообщений и публикаций. В большинстве исследований используются технологии машинного обучения и искусственного интеллекта. Лучший результат показали сверточные нейронные сети. Из используемых методов также следует выделить метод опорных векторов и дерево решений, т.к. именно они показывали самую высокую точность. Для составления выборки данных и правильного анализа полученных результатов применялись статистические методы.

Ключевые слова: социальные сети, моделирование социальных процессов, ориентированные графы, многослойная сверточная нейронная сеть, компьютерная лингвистика, кластеризация

• Поступила: 07.12.2021 • Доработана: 23.12.2022 • Принята к опубликованию: 09.02.2023

Для цитирования: Перова Ю.П., Григорьев В.Р., Жуков Д.О. Модели и методы анализа сложных сетей и социальных сетевых структур. *Russ. Technol. J.* 2023;11(2):33–49. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-33-49>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REVIEW ARTICLE

Models and methods for analyzing complex networks and social network structures

Julia P. Perova[@], Vitaly R. Grigoriev, Dmitry O. Zhukov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. The study aimed to investigate contemporary models, methods, and tools used for analyzing complex social network structures, both on the basis of ready-made solutions in the form of services and software, as well as proprietary applications developed using the Python programming language. Such studies make it possible not only to predict the dynamics of social processes (changes in social attitudes), but also to identify trends in socioeconomic development by monitoring users' opinions on important economic and social issues, both at the level of individual territorial entities (for example, districts, settlements of small towns, etc.) and wider regions.

Methods. Dynamic models and stochastic dynamics analysis methods, which take into account the possibility of self-organization and the presence of memory, are used along with user deanonymization methods and recommendation systems, as well as statistical methods for analyzing profiles in social networks. Numerical modeling methods for analyzing complex networks and processes occurring in them are considered and described in detail. Special attention is paid to data processing in complex network structures using the Python language and its various available libraries.

Results. The specifics of the tasks to be solved in the study of complex network structures and their interdisciplinarity associated with the use of methods of system analysis are described in terms of the theory of complex networks, text analytics, and computational linguistics. In particular, the dynamic models of processes observed in complex social network systems, as well as the structural characteristics of such networks and their relationship with the observed dynamic processes including using the theory of constructing dynamic graphs are studied. The use of neural networks to predict the evolution of dynamic processes and structure of complex social systems is investigated. When creating models describing the observed processes, attention is focused on the use of computational linguistics methods to extract knowledge from text messages of users of social networks.

Conclusions. Network analysis can be used to structure models of interaction between social units: people, collectives, organizations, etc. Compared with other methods, the network approach has the undeniable advantage of operating with data at different levels of research to ensure its continuity. Since communication in social networks almost entirely consists of text messages and various publications, almost all relevant studies use textual analysis methods in conjunction with machine learning and artificial intelligence technologies. Of these, convolutional neural networks demonstrated the best results. However, the use of support vector and decision tree methods should also be mentioned, since these contributed considerably to accuracy. In addition, statistical methods are used to compile data samples and analyze obtained results.

Keywords: social networks, modeling of social processes, oriented graphs, multilayer convolutional neural network, computational linguistics, clustering

• Submitted: 07.12.2021 • Revised: 23.12.2022 • Accepted: 09.02.2023

For citation: Perova J.P., Grigoriev V.R., Zhukov D.O. Models and methods for analyzing complex networks and social network structures. *Russ. Technol. J.* 2023;11(2):33–49. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-33-49>

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

Исследование социальных сетей и моделирование наблюдаемых в них процессов является важной научной и практической задачей, поскольку позволяет прогнозировать динамику изменения настроений их пользователей и тем самым обеспечивать управление общественными процессами в интересах стабильного экономического развития.

Цель данного обзора – охарактеризовать специфику этой области исследований, сформулировать ее основные задачи, указать связи с другими науками, дать краткий обзор основных подходов и используемых ресурсов. В статье рассмотрены динамические модели сложных социальных систем и сетевых структур, характеристики сложных сетей и наблюдаемых в них процессов, в т.ч., на основе построения графов и анализа данных с использованием языка программирования Python, а также исследованы вопросы применения нейронных сетей для составления необходимых прогнозов эволюции наблюдаемых в сложных социальных системах и сетевых структурах процессов. Значительное внимание в обзоре уделено методам компьютерной лингвистики, что необходимо для извлечения знаний из текстовых сообщений пользователей социальных сетей при создании моделей, описывающих наблюдаемые процессы.

СОЦИАЛЬНЫЕ СЕТИ И ИХ ОБЩИЕ СВОЙСТВА

Социальная сеть представляет собой структуру, состоящую из множества объектов и определенно на нем множества отношений. К крупнейшим по числу пользователей социальным сетям относятся Facebook¹ (запрещена в Российской Федерации), ВКонтакте², Одноклассники.ru³, YouTube⁴ и др. Термин «социальная сеть» обозначает сосредоточение социальных объектов, которые можно

рассматривать как сеть (или граф), узлы которой – объекты, а связи – социальные отношения [1]. Сегодня термин «социальная сеть» обозначает понятие, оказавшееся шире своего социального аспекта, оно включает, например, многие информационные сети, в т.ч. и WWW⁵. Формально любая сложная социальная сетевая структура – это граф $G = (V, E)$, где V – множество вершин, E – множество ребер графа. В графе социальной сети вершинами являются участники (или акторы), а ребра означают наличие отношений между ними. Отношения могут быть как направленными (ориентированный граф), так и ненаправленными. В теории сложных сетей выделяют три основных направления: исследование статистических свойств, которые характеризуют сети; создание моделей сетей; прогнозирование поведения сетей и наблюдаемых в них процессов при изменении их структурных свойств, в т.ч. в результате деструктивных воздействий на них.

Анализ социальных (social network analysis, SNA) сетей широко используется в ряде приложений и дисциплин. Некоторые распространенные приложения сетевого анализа включают в себя сбор и накопление данных, моделирование распространения сети, моделирование сети и выборки, анализ характерных признаков и поведения пользователя, ресурсную поддержку, обеспечиваемую сообществом, анализ взаимодействия на основе местоположения, социальный обмен и отбор, развитие систем рекомендаций, а также прогнозирование связей и анализ объектов. В частном секторе фирмы используют анализ социальных сетей для поддержки взаимодействия и анализа клиентов, маркетинга и бизнес-аналитики. Использование SNA государственным сектором включает в себя развитие стратегий участия руководства, анализ индивидуального и группового участия, использование средств массовой информации и основанное на сообществах решение проблем.

SNA представляет собой эффективную систему для обнаружения и интерпретации общественных онлайн-связей. Они исследуются с помощью ряда аналитических техник, в пределах от простых показателей центральности до многоуровневого моделирования. Если раньше сбор данных был задачей, требующей больших усилий и временных затрат,

¹ <https://www.facebook.com/>. Дата обращения 07.12.2021. / Accessed December 07, 2021.

² <https://vk.com/>. Дата обращения 20.09.2022. / Accessed September 20, 2022 (in Russ.).

³ <https://ok.ru/>. Дата обращения 20.09.2022. / Accessed September 20, 2022 (in Russ.).

⁴ <https://www.youtube.com/>. Дата обращения 20.09.2022. / Accessed September 20, 2022.

⁵ WWW – World Wide Web.

то сегодня электронные сети эту задачу несколько упростили. Это произошло за счет использования пассивных данных (таких как веб-страницы и данные почтовых хранилищ). Но увеличение эффективности привело к ограничению сбора данных, поэтому возникла необходимость определения критериев значимости отношений. Решение этих проблем требует технических навыков высокого уровня, в частности владения языками программирования или соответствующими программами.

Учитывая эти проблемы и ограничения, исследования предполагают более эффективные и надежные методы сбора данных в таких сетях. Кроме того, необходимо изучить такие проблемы как подмена узлов, наличие поддельных узлов и связей.

Для решения многих прикладных задач в настоящее время на практике наиболее часто применяют наборы готовых инструментов SNA, но необходимо отметить, что они имеют некоторые ограничения, например, не позволяют разрабатывать новые подходы и модели для изучения наблюдаемых процессов. Подробное описание используемых в SNA инструментов и методов можно найти в обзоре [2].

При анализе структуры сложных сетей, как и в теории графов, исследуются параметры отдельных узлов, параметры сети в целом, сетевые подструктуры. Вместе с тем, некоторые вопросы (например, планарность графа для теории сложных сетей) не представляют практического интереса. Существует несколько актуальных задач исследования сложных сетей, среди которых можно выделить следующие: определение клик в сети (клики – это подгруппы или кластеры, в которых узлы связаны между собой сильнее, чем с членами других клик); выделение компонент (частей сети), не связанных между собой, но узлы которых связаны внутри этих компонент; нахождение блоков и перемычек (узел называется перемычкой, если при его изъятии сеть распадается на несвязанные части); выделение группировок – групп эквивалентных узлов (имеющих максимально похожие профили связей).

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СЛОЖНЫХ СЕТЕЙ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Теория сложных сетей – это комплексное научное направление, находящееся на стыке дискретной математики, теории графов, теории алгоритмов, нелинейной динамики, теории фазовых переходов, теории перколяции и многих других направлений. Для анализа и моделирования сложных сетей необходимы базовые сведения из всех этих областей. Существует большое количество работ, например,

учебные пособия⁶, в которых рассматриваются вопросы теории сложных сетей: характеристики, алгоритмы, модели, задачи поиска, ранжирования, приводятся сведения, необходимые для математического и компьютерного моделирования и анализа сложных сетей.

Теория сложных сетей занимается следующими проблемами:

- 1) исследование стандартных характеристик графов сложных сетей разной природы – случайных графов, безмасштабных сетей, сетей малого мира и т.п.;
- 2) определение и изучение новых характеристик сложных сетей (например, эластичности и живучести при разрушающих воздействиях);
- 3) изучение различных «физических» процессов на сложных сетях – диффузия, эпидемические процессы в обществе, распространение различных потоков (например, трафика в вычислительных сетях или потоков транспортных средств в транспортных сетях);
- 4) методы восстановления, защиты и уничтожения сетей и решение вопросов их оптимизации (направление, важное для решения прикладных задач);
- 5) поиск неявных или латентных связей между участниками (может быть очень полезным для выявления членов преступных сообществ).

Следует отметить, что для исследования сложных сетей и установления основных закономерностей протекающих в них процессов используются методы, впервые созданные для исследования естественнонаучных задач, в частности методы теоретической физики.

Теория сложных сетей как область дискретной математики изучает характеристики сетей, учитывая не только их топологию, но и статистические феномены, распределение весов отдельных узлов и ребер, эффекты протекания, перколяции, проводимости в таких сетях тока, жидкости, информации и т.д. Оказалось, что свойства многих реальных сетей существенно отличаются от свойств классических случайных графов.

Изучения таких параметров сложных сетей, как кластерность, посредничество или уязвимость напрямую относятся к теории живучести, т.к. именно от этих свойств зависит способность сетей сохранять свою работоспособность при деструктивном воздействии на их отдельные узлы или ребра (связи). Несмотря на то, что в рассмотрение теории сложных сетей попадают различные сети – электрические,

⁶ Снарский А.А., Ландэ Д.В. *Моделирование сложных сетей: учебное пособие*. К.: НТУУ КПИ; 2015. 212 с. [Snarsky A.A., Lande D.V. *Modeling of complex networks. Textbook*. Kyiv: NTUU KPI; 2015. 212 p. (in Russ.).]

транспортные, информационные, наибольший вклад в развитие этой теории внесли исследования социальных сетей.

В связи со значительным ростом объема текстовой информации, генерируемой пользователями сети Интернет, и необходимостью автоматической обработки текстов на естественном языке с целью определения состояния узлов сложных социальных сетей (например, оппозиционности или лояльности) в настоящее время существенный импульс к своему развитию получила компьютерная лингвистика.

Задача компьютерной лингвистики может быть сформулирована как разработка компьютерных программ для автоматической обработки текстов на естественных языках с целью извлечения знаний, кластеризации текстов по смысловым группам, аннотированию и др.

Исходным материалом для извлечения необходимой лингвистической информации могут быть коллекции и корпуса текстов. Корпус текстов – это коллекция текстов, собранная по определенному принципу представительности (по жанру, авторской принадлежности и т.п.), в которой все тексты размечены, т.е. снабжены некоторой лингвистической разметкой (аннотациями) – морфологической, акцентной, синтаксической и т.п.⁷ В настоящее время существует не менее сотни различных корпусов – для разных естественных языков и с различной разметкой. В России наиболее известным является Национальный корпус русского языка⁸. Размеченные корпуса создаются лингвистами и используются для лингвистических исследований и настройки (обучения) используемых в компьютерной лингвистике моделей и процессоров с помощью известных математических методов машинного обучения.

Компьютерная лингвистика демонстрирует вполне осязаемые результаты в различных приложениях по автоматической обработке текстов на естественных языках. Дальнейшее ее развитие зависит как от появления новых приложений, так и от независимой разработки различных моделей языка, в которых пока не решены многие проблемы. Наиболее проработанными являются модели морфологического анализа и синтеза. Модели синтаксиса еще не доведены до уровня устойчиво и эффективно работающих модулей, несмотря на большое число предложенных формализмов и методов. Еще менее изучены и формализованы модели уровня семантики и прагматики, хотя автоматическая обработка дискурса уже

требуется в ряде приложений. Несмотря на это, уже существующие инструменты самой компьютерной лингвистики, использование машинного обучения и корпусов текстов могут существенно продвинуть решение этих проблем.

Следует отметить, что компьютерная лингвистика не только используется для анализа информации в сложных социальных системах с целью определения состояния узлов, но и сама использует достижения теории сложных сетей. Первым шагом при применении теории сложных сетей к анализу текста является представление этого текста в виде совокупности узлов и связей, построение сети языка (language network). Существуют различные способы интерпретации узлов и связей, что приводит к различным представлениям сети языка. Узлы могут быть соединены между собой, если соответствующие им слова стоят рядом в тексте, принадлежат одному предложению, соединены синтаксически или семантически. Сохранение синтаксических связей между словами приводит к изображению текста в виде направленной сети (directed network), где направление связи соответствует подчинению слова.

Изучение свойств графов сложных сетей становится все более популярным в связи с растущей доступностью научных и социальных данных, представленных в графовой форме. Из-за этого многие исследователи сосредоточились на разработке улучшенных графовых нейросетевых моделей. Одним из основных компонентов графовой нейронной сети является оператор агрегации, необходимый для генерации представления уровня графа из набора вложений уровня узла. Оператор агрегации имеет решающее значение, т.к. он должен, в принципе, обеспечивать представление графа инвариантное к изоморфизму, т.е. представление графа должно быть функцией узлов графа, рассматриваемых как некоторое множество.

В работе [3] рассмотрен оператор агрегации DeepSets, основанный на самоорганизующихся картах (self-organizing maps, SOM), для преобразования набора представлений узлового уровня в один граф-уровень. Принятие SOM позволяет вычислять представления узлов, которые встраивают информацию об их взаимном сходстве. Экспериментальные результаты на нескольких реальных наборах данных показывают, что предложенный подход обеспечивает улучшенную прогностическую производительность по сравнению с общепринятой суммирующей агрегацией и многими современными графовыми нейронными сетевыми архитектурами, представленными в литературе.

В рамках работы [4] рассмотрена архитектура сверточных нейронных сетей, включая типы используемых слоев и принципы их работы, настройки

⁷ Боярский К.К. *Введение в компьютерную лингвистику*: учебное пособие. СПб.: НИУ ИТМО; 2013. 72 с. [Boyarsky K.K. *Introduction to computational linguistics*. Textbook. St. Petersburg: NIU ITMO; 2013. 72 p. (in Russ.).]

⁸ <https://ruscorpora.ru/>. Дата обращения 20.09.2022. / Accessed September 20, 2022 (in Russ.).

и особенности обучения. Описана возможность поиска и предотвращения утечек информации из корпоративных информационных систем в Интернете. Предложена архитектура сверточных нейронных сетей для первичной обработки информации на интернет-страницах: описаны типы слоев, составляющих сеть, их назначение и математическое представление, а также используемые гиперпараметры. В работе [4] представлена архитектура сети и модель ее обучения. Описана возможность использования сетей такого типа для решения задач по обнаружению утечек конфиденциальных данных, проанализированы существующие решения и подходы. Рассмотрены подходы, позволяющие применять сверточные нейронные сети для решения задач классификации веб-страниц, содержащих источники новостей и информации, навигационные и информационные источники на основе их текстового содержимого.

В качестве примера готовой системы можно привести BERT (Bidirectional Encoder Representation Transformers, двунаправленная нейронная сеть-кодировщик) [5] – модель представления языка, которая предназначена для предварительного обучения глубоких двунаправленных представлений на простых немаркированных текстах путем совмещения левого и правого контекстов во всех слоях. Это позволяет настраивать предварительно обученную модель BERT с помощью лишь одного дополнительного выходного слоя и получать наиболее актуальные результаты для широкого спектра задач.

Стандартные модели представления языка, существовавшие до BERT, например, OpenAI GPT⁹ (Generative Pre-trained Transformer, генеративный предварительно обученный трансформатор), были однонаправленными. Это ограничивало выбор архитектур, которые можно использовать для предварительного обучения. Например, в OpenAI GPT каждый токен мог обслуживать только предыдущий токен (слева направо) в слое внутреннего внимания модели. Токены предназначены для электронного удостоверения личности, которые выдаются пользователю после успешной авторизации. В некотором смысле токен – это электронный ключ для доступа к чему-либо.

Такой подход создает ряд ограничений, поэтому для предварительного обучения BERT используют маскированную языковую модель (masked language model), в которой случайным образом маскируется некоторое количество токенов во входных данных. Затем модель должна предсказать исходное значение замаскированных слов, исходя из контекста. Это предоставляет возможность совмещать левый и правый контексты, что в свою очередь позволяет

предварительно обучить двунаправленную модель представлений.

В использовании BERT есть два этапа.

1. Предварительное обучение – модель обучается на немаркированных данных, выполняя различные задачи.
2. Точная настройка – модель загружается с предварительно обученными параметрами и обучается на помеченных данных из последующих задач.

Помимо теоретических методов для анализа сложных сетей и протекающих в них процессов часто используется численное моделирование. Кроме того, одним из наиболее мощных и широко распространенных инструментов анализа сложных сетей является обработка данных средствами языка программирования Python и его библиотек [7–12]. Для Python разработан специальный пакет (Python-networkX) – инструмент для создания, манипулирования и изучения сложных сетей, позволяющий определить многие их характеристики. Здесь также можно упомянуть и инструменты NATASHA¹⁰ – открытой библиотеки для языка программирования Python, которая позволяет извлекать структурированную информацию из текстов на русском языке. NATASHA отличается лаконичным интерфейсом и включает экстракторы для имен, адресов, сумм денег, дат и некоторых других сущностей.

Язык Python и написанные для него библиотеки можно использовать для эффективного решения широкого круга задач анализа разнообразных данных:

- многомерные списки (матрицы);
- табличные данные, когда данные в разных столбцах могут иметь разный тип (строки, числа, даты и т.п.). Эти данные обычно хранятся в реляционных базах или в файлах с запятой в качестве разделителя;
- данные, представленные в виде нескольких таблиц, связанных между собой по ключевым столбцам (то, что в SQL называется первичными и внешними ключами);
- равноотстоящие и не равноотстоящие временные ряды.

Этот список далеко не полный. Значительную часть наборов данных можно преобразовать к структурированному виду, более подходящему для анализа и моделирования. В тех случаях, когда это не удастся, есть возможность извлечь из набора данных структурированное множество признаков. Например, подборку новостных статей можно преобразовать в таблицу частот слов, к которой затем применить анализ эмоциональной окраски.

⁹ <https://openai.com/api/>. Дата обращения 20.09.2022. / Accessed September 20, 2022.

¹⁰ <https://pypi.org/project/natasha/>. Дата обращения 20.09.2022. / Accessed September 20, 2022.

АНАЛИЗ СЕТЕВЫХ СТРУКТУР И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Обзор опубликованных статей показывает, что методы SNA являются полезным инструментарием для создания полноценной картины общественного настроения. Данные методы дешевле в реализации, чем методы опросов населения и предоставляют больше данных, т.к. при опросах не все люди высказывают свою реальную точку зрения. На основе этого можно изучать особенности поведения современного общества в эпоху распространения социальных сетей.

Рассматривая динамический подход, а именно направление в изучении социальных сетей, в котором объектами исследований являются изменения в сетевой структуре с течением времени, можно отметить, что структурный анализ и анализ поведения связей в социальных сетях необходимы для того, чтобы определить наиболее важные вершины, связи, сообщества и развивающиеся регионы сети. Такой анализ позволяет осуществлять обзор глобального эволюционного поведения сети.

Обнаружение сообществ в динамических сетях уже не требует сложной математической эвристики. Используя простое сопоставление временных срезов, можно определить динамически изменяющиеся временные сообщества пользователей социальных сетевых структур. Исследование этих динамических сообществ позволяет существенно упростить анализ динамики сложной системы социальных взаимодействий по мере ее развития с течением времени.

Рассмотрим работу [13], в которой представлены фундаментальные структуры динамических социальных сетей, основанные на наборе данных, полученных с высоким разрешением, описывающем плотно связанную популяцию из 1000 студентов-первокурсников в крупном европейском университете. Авторами этой статьи рассматриваются физически короткие взаимодействия, измеряемые с помощью Bluetooth, дополненные информацией из телекоммуникационных сетей (телефонные звонки и текстовые сообщения), онлайн-социальных сетей, а также геолокационными и демографическими данными.

Человеческие социальные сообщества пересекаются за счет отдельных людей, участвующих в нескольких сообществах (в теории сложных сетей такие узлы называются переключками). В течение недели проходят встречи субъектов созданной структуры (такие структуры называются ядрами). Это может быть как собрание друзей вне вуза, так и собрание всех студентов. В сети коротких физических взаимодействий собрания требуют чтобы все

участники присутствовали одновременно и находились в физическом контакте.

Местоположение членов ядер также можно спрогнозировать. Объектом, помогающим это сделать, являются сами ядра. Наблюдая за обычными маршрутами людей, составляющих ядро, их поведенческими привычками, можно спрогнозировать географическое местоположение человека в следующем временном интервале с высокой точностью (в среднем в 93% случаев). Такая высокая точность доказывает, что модели мобильности человека являются регулярными. Стоит также отметить, что члены ядра имеют меньше состояний местоположения, чем отдельные люди, что приводит в среднем к меньшим значениям информационной энтропии.

Тот факт, что геопространственное исследование происходит как часть социальной группы, но ограничено определенными временными рамками, показывает сложное взаимодействие между временем, местоположением и социальным контекстом и подтверждает гипотезу о том, что иногда, когда люди наиболее непредсказуемы в геопространственной области, они демонстрируют предсказуемое социальное поведение.

Связывая результаты работы [13] с литературой по динамическому обнаружению сообществ, можно отметить, что в литературе существует множество методов, которые позволили бы обнаруживать собрания в повседневной жизни, но в [13] использовали простое сопоставление компонентов графа, чтобы подчеркнуть, что возникающие социальные структуры настолько очевидны, что эти сложные методы не нужны.

Таким образом, работа [13] дает количественную оценку долгосрочных закономерностей, закодированных в микродинамике большой системы взаимодействующих индивидов, характеризующейся высокой степенью упорядоченности и предсказуемости.

Рассмотрим еще одну работу, посвященную динамическим моделям [14]. Последние разработки в области социальных сетей сместили акцент со статических представлений на динамические. Для этого необходимы новые методы их анализа и моделирования. Были установлены два конкретных механизма, которые играют центральную роль в возникновении и эволюции процессов, формирующих социальные сети. Первый – это стратегия активации социальных связей, т.е. процесс отбора, приводящий к созданию новой связи или активации старой. Очевидно, что активация социальных связей неслучайна. Эмпирические наблюдения показывают, что люди, как правило, распределяют большую часть своих социальных действий в направлении уже существующих сильных связей, в то время как выделяют меньшее количество взаимодействий для

создания новых социальных отношений или для поддержания слабых связей. Другими словами, со временем некоторые связи часто используются в повторяющихся взаимодействиях, в то время как другие – нет. Второй механизм – всплеск активности. Активность отдельных индивидов развивается через гетерогенные распределения времени между событиями. Кроме того, склонность индивидов участвовать в социальном акте в единицу времени также неоднородна. Фактически, эмпирические измерения на реальных наборах данных, фиксирующих различные типы социальной динамики, показывают, что активность неоднородно распределена среди людей. Другими словами, не только индивиды проявляют гетерогенные склонности к социальной активности, но и их активация носит взрывной характер, и эта взрывная активность может существенно повлиять на эволюцию сетей. Хотя изучение этих механизмов было в центре внимания целого ряда работ, общая структура моделирования все еще отсутствует. Такая структура позволила бы дать аналитическую характеристику того, как взаимодействие гетерогенных паттернов активности и механизмы отбора связей формируют эволюцию социальных сетей и происходящие в них процессы. Для этого авторы вводят модель изменяющихся во времени сетей, которая позволяет одновременно регулировать относительную силу всплеска активности и стратегию активации связи. Аналитически решают асимптотическое поведение модели и находят нетривиальную фазовую диаграмму, управляющую взаимодействием двух процессов. В частности, наблюдают режим, в котором всплеск управляет эволюцией сети, и другую область, где динамика полностью определяется процессом отбора связей. Если повторное использование ранее активированных связей достаточно сильно и люди склонны предпочтительно контактировать с одним и тем же социальным кругом, всплеск приводит к механизму усиления даже при наличии расходящихся временных интервалов между событиями, не оказывая никакого влияния на эволюцию сети. Таким образом, предлагаемая авторами структура может быть использована для классификации временных особенностей реальных сетей и может дать новое представление о влиянии социальных механизмов на процессы распространения в социальных сетях.

В работе [15] говорится о рекомендательных системах. Существуют ситуации принятия решений в условиях информационной перегрузки в Интернет, когда у людей есть подавляющее количество доступных вариантов выбора, например, продукты для покупки на сайте электронной коммерции или рестораны для посещения в большом городе. Рекомендательные системы (reciprocal

recommender systems, RRS) возникли как управляемый данными персонализированный инструмент поддержки принятия решений. Они способны обрабатывать связанные с пользователем данные, фильтровать и рекомендовать элементы на основе предпочтений, потребностей и/или поведения пользователя. В отличие от большинства традиционных рекомендательных подходов, где предметами являются неодушевленные объекты, рекомендованные пользователям, и успех определяется исключительно реакцией конечного пользователя на полученную рекомендацию, в RRS пользователи становятся объектами, рекомендованными другим пользователям. Следовательно, как конечный пользователь, так и рекомендуемый пользователь должны принять рекомендацию «соответствия», чтобы обеспечить успешную производительность RRS. Работа RRS позволяет не только прогнозировать точные оценки предпочтений на основе данных взаимодействия пользователей, но и дает возможность вычислять взаимную совместимость между парами пользователей путем применения процессов объединения односторонней информации о предпочтениях каждого пользователя.

В работе [16] оценка общественного мнения и общественных настроений осуществляется с помощью метода, основанного на лексиконе, унаследованном от классического подхода к анализу настроений в обществе. Нейронная сеть определяет ключевые слова, которые позже проверяются экспертами в предметной области. Программа сначала анализирует статьи и документирует, насколько часто различные слова встречаются в статьях. После этого программа выделяет наиболее часто встречающиеся слова и делает их ключевыми. На их основе программа строит лексикон, характерный для общественного настроения на основе новостных статей.

Описанная в работе [17] программа использует метод анализа тем из социальной сети, который кроме сбора, обработки и сортировки информации, также измеряет время, прошедшее между публикациями, чтобы потом на основании этих данных составить шкалу времени. Таким образом, в результате работы программы получается граф, по которому можно проследить рост и падение популярности определенных тем, обсуждаемых в социальных сетях. Также можно проследить, какими при этом настроениями в обществе сопровождаются эти события и каков период активного обсуждения определенных тем.

В статье [18] говорится о методе изучения политических настроений в обществе, использующем SNA. Исследование проводилось с использованием поиска в тексте заранее вводимых в базу данных программы ключевых слов. Главная цель создания

данной программы – проследить, благодаря чему определенные политические партии стали популярны и какие темы обсуждаются больше всего. Также с помощью программы можно узнать, сколько человек поддерживает определенную политическую партию.

Методика SNA с помощью нейронных сетей представлена в статье [19]. Она использовалась во время президентских компаний с целью проследить настроения в обществе. Данная методика может быть использована в качестве замены традиционных методов анализа общественных настроений, потому что у нее есть способность находить и анализировать радикальные мнения, что невозможно сделать традиционными методами.

Работа [20] использует метод сбора и обработки данных аккаунтов в социальной сети Twitter¹¹ (запрещена в Российской Федерации) для определения пола, возраста, политических предпочтений и приблизительного места проживания. Для обработки данных используется машинное обучение, с помощью которого авторы статьи смогли собрать информацию пользователей социальной сети Twitter (запрещена в РФ) на основе их записей, подписок и информации аккаунта.

В статье [21] говорится о методе определения политических предпочтений пользователя путем анализа записей пользователей, относящихся к разным политическим группам. Путем добровольных опросов людей, принадлежащих к разным политическим группам, программа анализирует язык, который присущ каждой из групп, и выделяет для каждой из групп свои ключевые слова. На основе этих слов позже программа будет анализировать профиль пользователя в социальной сети Twitter (запрещена в РФ) и на этой основе определять, к какой из политических групп относится пользователь. На основе опроса определяются пол и возраст человека, чтобы составить статистику, сопоставив эти данные и политические предпочтения пользователей. После опроса анализируются аккаунты, оставленные пользователями, чтобы удалить аккаунты, принадлежащие другим людям, не принимавшим участие в опросе. После этого со страницы пользователей анализируются последние 3200 записей. На основе данных записей составляются базы данных ключевых слов, характерных для определенной политической группы. На основе этих баз данных составляются диаграммы, которые показывают, с какой частотой они встречаются в записях людей, принадлежащих к данной группе. Также при анализе программой записей людей выявляется их настроение.

Статья [22] является комплексным анализом следа, который человек оставляет в интернете.

Совершение покупок, общение, многие повседневные дела происходят в режиме онлайн. Каждое действие, которое совершается в социальных сетях, не проходит бесследно. У каждого пользователя Интернет существует так называемый цифровой след – те действия, которые он совершает в интернете, и информация о которых там остается. Это может быть как публичная информация, которую пользователи оставляют на своих страницах в социальных сетях, так и непубличные действия, информация о которых все равно остается в сети и может быть оттуда извлечена. Авторы утверждают, что по этому цифровому следу можно многое сказать о пользователе. Всего они выделяют 14 различных демографических признаков, которые удастся установить по этому социальному следу.

Данные легко собирать и использовать, когда пользователь сам размещает их в своем профиле, но, даже если он предпочитает скрывать информацию о себе, есть много способов ее узнать. Авторы приводят некоторые способы – анализ лог-файлов смартфона, лайков в социальной сети, истории поиска браузера, частоты использования хештегов и т.д.

Приведены ссылки на исследования, подтверждающие, что пользователи более склонны общаться с теми, с кем находятся в одной социальной группе. Большая часть участников одной группы имеет схожие черты поведения и манеру общения. Это открывает гигантский простор для дальнейшего изучения.

Социальные сети и иные сервисы, которыми мы пользуемся, собирают нашу личную информацию. В большинстве случаев мы сами на это соглашаемся, но может ли социальная сеть собрать какую-либо информацию о пользователе, который в ней не зарегистрирован? В статье [23] рассмотрена гипотеза теневого профиля (shadow profile), согласно которой социальная сеть может собирать на основе публичной информации пользователей этой сети и данных из их телефонных книг (если, например, пользователь сам предоставляет социальной сети доступ) информацию о тех людях, которые в данной социальной сети не зарегистрированы. В статье доказывается факт того, что теневой профиль как структуру можно создать, и чем крупнее социальная сеть, тем точнее будут данные теневых профилей.

В исследовании [24] авторами используется большое количество информации об аккаунте пользователя: время публикации каждой из записей и частота их публикации; количество публикаций, содержащих геоданные; репосты записей других пользователей; число понравившихся публикаций; число ответов на публикации других пользователей; количество упоминаний других пользователей; число публикаций, содержащих медиа-данные и среднее количество медиа-данных на одну публикацию;

¹¹ <https://twitter.com/>. Дата обращения 07.12.2021. / Accessed December 07, 2021.

дата создания аккаунта; количество подписок и подписчиков и много других данных и соотношений, связанных с информацией об аккаунте. Это пример комплексного и полного исследования профиля в социальной сети, который не включает анализ самих медиа-данных и анализ друзей/подписчиков пользователя. Такое исследование дает возможность наиболее точно определить возраст пользователя, основываясь на большом количестве информации. В данной статье также более подробно описаны алгоритмы создания выборки, обучения нейросети и непосредственно анализа профилей пользователей.

Поскольку с ростом сети поиск сходства между узлами в сети является трудоемким для оптимизации процессом, исследователи в работе [25] для решения проблем прогнозирования связей и обнаружения сообществ используют роевые алгоритмы. Методы оптимизации на основе роя, используемые в SNA, сравниваются в этой статье с анализом сообщества и анализом соединений. В качестве будущей области применения методы оптимизации на основе роя могут быть распространены на области использования нейронных сетей глубокого обучения, особенно для обновления градиентов при создании моделей таких сетей.

Социальная сеть – это социальная структура с набором социальных субъектов и социальными взаимодействиями между ними. Изучение динамики этих структур может быть использовано для объяснения локальных и глобальных экономических закономерностей, которые важны для развития. В статье [26] описаны разработка и анализ автоматических систем управления для принятия решений об инвестициях в нефтяные проекты. Принятию решения предшествует описание инженерами этого проекта с предоставлением необходимых экономических данных. На основе этого может быть принято решение о проведении профессионального анализа для определения, является ли проект осуществимым. Для автоматизации ручного процесса и преодоления недостатков традиционных методов оценки (например, экспертная оценка зависит от качества выбора самих экспертов) при экономической оценке нефтяных проектов применяется нейронная сеть обратного распространения (back propagation).

Огромное количество работ проводилось с использованием анализа из социальной сети Twitter (запрещена в РФ). В работе [27] рассмотрен анализ сообщества с экстремистскими взглядами с использованием SNA и нейронных сетей. По результатам исследования доказано, что возможно проанализировать сообщество и найти людей, связанных с ним, а также возможно предугадать планы данного сообщества с целью предотвращения террористической деятельности.

В статье [28] говорится об определении личных качеств пользователей социальной сети Twitter (запрещена в РФ) на основе сделанных ими записей, а также на основе их подписок. Программа учитывает пол, возраст, образование и политические предпочтения для получения более точного результата анализа. Таким образом, на основе записей и подписок пользователей возможно определить область его интересов, после чего можно составить схему зависимости пола, возраста и т.п. от области интересов и проследить, какие группы пользователей преобладают в определенной группе интересов.

В исследовании [29] снова используется сбор данных пользователей около 1500 сайтов и сопоставление этих данных с данными их аккаунтов в Twitter (запрещена в РФ). На основе этих данных строится более точная демографическая модель пользователей. Программа анализирует интересы пользователей, используя не только данные их социальных сетей, но и данные сервиса Quantcast¹², что позволяет собрать более точную информацию. В результате составляется таблица демографических данных пользователей и сообществ по интересам, к которым они принадлежат.

Авторы работы [30] сопоставляют демографические данные пользователей социальной сети Twitter (запрещена в РФ) и их политические предпочтения. Полученная статистика показывает, какие партии поддерживают различные группы населения. Судить об этом можно по совокупности таких переменных как пол, возраст, доход, раса и т.д.

В работах [31–34] SNA проводится с целью отследить политическое настроение населения. Таким образом, благодаря SNA можно составить карту поддержки различных политических партий, проследить настроения в обществе и узнать рейтинг политических партий в разные периоды до и после выборов, сопоставив при этом эти уровни поддержки с событиями, происходящими вокруг партии.

Авторы статей [35, 36] проводят анализ с использованием машинного обучения и тональности текста, которые являются одним из основных инструментов SNA, особенно для восстановления демографических признаков, для чего необходимы знания в области машинного обучения и компьютерной лингвистики. Изучая компьютерную лингвистику, можно найти множество различных методов анализа письменного текста помимо анализа тональности. Многие из них, возможно, позволят расширить инструментарий для SNA или улучшить уже имеющиеся алгоритмы. С помощью методов машинного обучения удастся автоматизировать процесс анализа и сделать его гораздо удобнее.

¹² <https://www.quantcast.com/>. Дата обращения 20.09.2022. / Accessed September 20, 2022.

Исследования в статьях [37–41] направлены на анализ профилей в социальных сетях с использованием гендерной классификации, которая решала проблему распознавания лиц с помощью нейронных сетей, алгоритмов, работающих с использованием смайликов-эмоджи в исходном тексте и определения возраста и пола по фотографии.

В статье [42] описан метод анализа СМС-сообщений с целью классификации отправителей по половому и возрастному признаку. Для исследования авторы использовали алгоритмы с различными структурами нейронных сетей, а также различные методы работы с естественным языком. В конечном итоге, наилучший результат по определению возраста показал метод опорных векторов – точность около 71%. Лучший результат точности определения пола – почти 80%, показало дерево решений J48. Стоит отметить, что различные методы и способы и фильтры обработки естественного языка влияли на результаты только незначительно, практически не улучшая ни точность, ни быстроту работы алгоритмов.

Предметом исследования [43] являются микроблоги. Авторы использовали метод анализа ключевых слов. Это хорошо сочетается со средой, в которой проводится анализ, ведь люди в микроблогах часто обсуждают какие-то события, новости или дискутируют на определенную тему. С помощью такого метода и методов машинного обучения удалось разделить первоначальную выборку на шесть возрастных групп и обозначить тему, которую участники каждой возрастной группы чаще всего обсуждают и на которую чаще всего высказывают свои мысли. Выяснилось, что подростки до 18 лет чаще всего обсуждают спорт; молодые люди 18–25 лет больше всего говорят о развлечениях; люди в возрасте от 25 до 30 лет обсуждают, в основном, семью и бизнес; людей постарше (31–36 лет) больше всего интересуют технологии; пользователи 26–40 лет начинают беспокоиться о своем здоровье и чаще высказываются об этом, а те, кто старше 40, больше всего любят обсуждать политику. Таким образом, каждой возрастной группе была определена самая частая тема для обсуждения. Это не значит, что каждый член группы обязательно обсуждает эту тему, но с большей вероятностью человек, обсуждающий эту тему, относится к этой возрастной группе.

Можно рассмотреть несколько статистических исследований [44–46], которые широко использовали метод анализа профилей в социальных сетях. Цель этих исследований – выявить социальную мобильность людей, основываясь на их публикациях, сопровождаемых геоданными. Авторами было найдено большое количество таких публикаций, по ним было составлена примерная карта перемещений

пользователя, выявлены основные центры активности и установлено место жительства человека. По данным о месте жительства были выяснены имена людей. Далее, используя базу данных имен, распределенных по полу, удалось установить пол более половины все исследованных аккаунтов, по данным о фамилии исследователи попытались установить информацию о расе и возрасте пользователей – успешно в 38% и 14% случаев соответственно. Данное исследование показало, что возможно установить некоторые демографические признаки, зная только о передвижениях человека или зная его имя и фамилию.

В статье [47] описывается способ определения пола и возраста с использованием функции голосовых сообщений. Приведены результаты, согласно которым авторам удалось достичь точности в 80% при определении пола и возраста говорящего. Такую технологию можно вполне успешно использовать для анализа голосовых сообщений в социальных сетях, если возникает такая необходимость, но в современных реалиях такой алгоритм вряд ли найдет в этой сфере широкое применение, т.к. голосовые сообщения посылаются лично адресату, а анализ социальных сетей обычно проводится по публично доступной информации. В других отраслях значение такой технологии сложно переоценить, она должна быть полезна в криминалистике, биометрии, для проектирования систем распознавания или воссоздания речи.

Помимо обычного текста и рассмотренных ранее дополнений к нему – репостов, картинок, смайликов и подписок на других пользователей, в социальных сетях также часто используются ссылки и хештеги. Ссылки используются для того, чтобы поделиться каким-то контентом, будь то картинка или новость, а хештеги – для обозначения темы публикации и упрощения нахождения этой публикации в поиске другими пользователями. Авторы статьи [48] предполагают, что контент, находящийся по ссылкам, которыми делятся пользователи, и используемые хештеги могут многое сказать о возрасте этих пользователей. Исследователи решили проанализировать публикации различных пользователей для определения их возрастной группы. В отличие от многих похожих исследований они использовали не только сами публикации, но и контент, находящийся по ссылкам, которыми делятся пользователи, а также недавние публикации по хештегу, который указывает пользователь.

В статье [49] предлагается новый метод прогнозирования изменений в сложных социальных сетях, основанный на применении теории перколяции и подходов, принятых в стохастической динамике. Обсуждаются новые результаты

компьютерного моделирования влияния плотности социальной сети на порог ее проникновения. Пороги перколяции рассчитываются для различных плотностей сети и могут использоваться в моделях, описывающих стохастическую динамику перехода системы из одного состояния в другое. Представленная в статье стохастическая модель предоставляет возможность скачкообразного перехода настроений (состояний) людей в социальной сети в течение очень короткого промежутка времени без каких-либо внешних воздействий, что определяется особенностями самоорганизации системы и памятью ее узлов о предыдущих состояниях.

Разработанная модель позволяет создать алгоритм мониторинга социальных состояний, основанный на теории перколяции и стохастической динамике, который может быть легко применен на практике. Суть этого алгоритма заключается в следующем.

1. С помощью социологического мониторинга определяется среднее количество подключений на человека в данной социальной сети; затем определяется доля негативно настроенных людей в данный момент времени ($t = 0$). Средняя плотность позволяет рассчитать порог перколяции сетевой структуры, т.е. долю участников сети, имеющих определенные взгляды, которые позволяют этим взглядам свободно распространяться в сети.
2. После фиксированной единицы времени (день, неделя и т.д.) определяется доля участников с определенными взглядами, которые в данный момент исследуются. Изменение этой доли по сравнению с предыдущей долей позволяет определить значение восходящей и нисходящей тенденций.
3. Далее возможно использовать полученную информацию о тенденциях, пороге перколяции и начальной доле участников сети с определенными представлениями для отслеживания и управления участниками сети.

Полученные результаты могут быть применены для управления социальными процессами. В одном из подходов сначала анализируются настроения в социальной сети. Далее современные методы психолингвистического анализа, основанные на технологиях искусственных сетей, позволяют отнести каждого пользователя к определенной целевой группе в соответствии с его настроениями и взглядами. Сетевые узлы, которые могут быть идентифицированы как пользователи, нарушающие некоторые законы, например, распространяющие экстремистские взгляды и настроения, блокируются. Однако существуют группы узлов, которые не нарушают никаких законов, но потенциально могут перейти в группу с экстремистскими взглядами. Поскольку они не нарушают законы, их нельзя заблокировать, но все

же можно ограничить их коммуникативные способности, используя технические подходы, например, путем снижения скорости передачи данных и уменьшения количества других узлов или соединений, доступных для них. При этом порог проникновения для информации, которая может свободно передаваться по сети, увеличивается.

Авторы^{13, 14} [50–52] предлагают метод оценки средств массовой информации в нескольких модальностях (темы, критерии оценки/свойства, классы), сочетающий тематическое моделирование корпусов текстов и принятие многокритериальных решений. Оценка основана на анализе корпусов следующим образом: условное распределение вероятностей носителей по темам, свойствам и классам рассчитывается после формирования тематической модели корпусов. Для получения весов, описывающих, как каждая тема соотносится с каждым критерием оценки и с каждым классом, описанным в документе, используется несколько подходов, в т.ч. ручная маркировка, многокорпоративный подход и автоматический подход. Предлагаемый многокорпоративный подход предполагает оценку тематической асимметрии корпусов для получения весов, описывающих отношение каждой темы к определенному критерию. Эти веса в сочетании с тематической моделью могут быть применены для оценки каждого документа в корпусах в соответствии с каждым из рассмотренных критериев и классов. Предложенный метод был применен к корпусу из 804829 новостных публикаций из 40 казахстанских источников, опубликованных с 1 января 2018 г. по 31 декабря 2019 г. Была получена модель BigARTM (200 тем). Эксперименты подтверждают общую возможность оценки носителей с использованием тематической модели текстовых корпусов, поскольку в задаче классификации была достигнута оценка области под кривой рабочих характеристик приемника (ROC AUC) 0.81, что сопоставимо с результатами, полученными для той же задачи с применением модели BERT.

Разработанная система, в которую интегрирована предлагаемая модель, позволяет решать классические задачи, такие как простые отчеты или анализ настроений. Кроме того, она также имеет ряд уникальных вариантов использования, которые отличают ее от существующих решений: автоматический анализ по теме, значимому событию и объекту без необходимости формировать запросы на основе

¹³ Bushman B., Whitaker J. Media influence on behavior. Reference module. In: *Neuroscience and Biobehavioral Psychology*. 2017. <http://scitechconnect.elsevier.com/neurorefmod/>. Дата обращения 24.11.2020. / Accessed November 24, 2020.

¹⁴ Bandari R., Asur S., Huberman B.A. *The pulse of news in social media: forecasting popularity*. <https://arxiv.org/pdf/1202.0332.pdf>. Дата обращения 20.09.2020. / Accessed September 20, 2020.

ключевых слов; анализ по произвольному списку критериев, не ограниченному настройками, но также включающему социальную значимость, популярность, манипулятивность, пропагандистский контент, отношение к определенной стране, отношение к определенной области и т.д.; анализ динамического поведения тем; прогностический анализ на уровне темы.

В работах [53–55] предложена методика KromFac, с помощью которой проводится обнаружение сообщества методом регуляризованной неотрицательной матричной факторизации (non-negative matrix factorization) на основе графовой модели Кронекера. KromFac сочетает в себе методы анализа сети и обнаружения сообщества в единой унифицированной структуре.

Работа [56] посвящена SNA и разработке методов деанонимизации их пользователей. Под деанонимизацией понимается установление личности пользователя в сети либо подлинного места выхода в сеть. После сравнительного анализа существующих методов и моделей деанонимизации пользователей [57–59] авторы предлагают модифицированный метод на основе алгоритма объединения выделенных вершин для дефрагментации постановочной задачи деанонимизации на меньшие подзадачи, решение которых возможно с помощью уже существующих методов. Основной результат данной работы заключается в разработке нового подхода к оптимизации методов идентификации пользователей социальных сетей на основе алгоритма попарных разбиений. Предложенный алгоритм позволяет улучшить характеристики существующих технологий деанонимизации, а также представляет теоретическую и практическую значимость для разработки систем моделирования информационных акций в социальных сетях.

В работах [60, 61] представлены разработанные авторами модели описания стохастической динамики изменения состояний в сложных социальных системах, учитывающие процессы самоорганизации и наличие памяти. Для создания модели рассмотрены графические схемы вероятностей переходов между возможными состояниями описываемых систем с учетом предыдущих состояний, что позволяет учитывать память и описывать не только марковские, но и немарковские процессы. На основании этого подхода выведено нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка, позволяющее сформулировать и решать граничные задачи для определения функции плотности вероятности амплитуды отклонений параметров, описывающих наблюдаемые процессы нестационарных временных рядов в зависимости от величин интервала времени ее определения и глубины учета памяти. Полученное дифференциальное уравнение содержит не только члены,

отвечающие за случайное изменение (диффузию) и упорядоченное изменение (снос), но и содержит член, отвечающий за возможность самоорганизации.

ВЫВОДЫ

Сетевой анализ помогает структурировать модели взаимодействия между социальными единицами: людьми, коллективами, организациями и т.д. По сравнению с другими методами сетевой подход имеет одно неоспоримое преимущество: он позволяет оперировать данными на разных уровнях исследования – от микро- до макроуровня, обеспечивает преимущество этих данных. Также сетевые методы помогают лучше понять и описать процессы теоретически и количественно. Актуальность сетевого анализа растет, поскольку в настоящий момент происходит глобализация общемировых процессов, и, прежде всего, в форме сетевизации.

Практически все исследования используют различные методы работы с текстом, т.к. общение в социальных сетях почти полностью состоит из текстовых сообщений и публикаций. Для применения этих методов необходимы знания в области компьютерной лингвистики. Используется анализ тональности, лексический анализ, выделение ключевых слов.

Изучив результаты исследований в этой области, можно сказать, что практически во всех исследованиях используются технологии машинного обучения и искусственного интеллекта. Существует множество архитектур и методов работы нейронных сетей, но лучший результат показали сверточные нейронные сети. Из используемых методов следует выделить метод опорных векторов и дерево решений, т.к. в большей части исследований именно они показали самую высокую точность.

Для правильной работы с нейронными сетями, нужно уметь правильно составлять выборку. Для этого необходимо иметь четкое представление о том, по каким признакам и каким исходным данным необходимо классифицировать пользователей. На основе статистических данных, которые использовали многие исследователи, также можно прогнозировать результаты. Знание статистики необходимо как для составления выборки, так и для правильного анализа полученных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данного обзора является знакомство широкого круга читателей с современными моделями и методами анализа сложных социальных сетевых структур и применяемыми для этого инструментами, основанными как на готовых решениях в виде сервисов и программного обеспечения, так и на

собственных приложениях для проведения исследований с использованием языка программирования Python. Рассмотрение достоинств и недостатков существующих моделей и методов является очень важным для постановки и проведения дальнейших исследований. Результатом проделанной работы является вывод о том, что методы SNA служат полезным инструментарием для создания полноценной картины общественного настроения.

В обзоре описана специфика решаемых при исследовании сложных сетевых структур основных задач и их междисциплинарность, связанная с использованием методов системного анализа, теории сложных сетей, текстовой аналитики и компьютерной лингвистики, нейронных сетей и т.д. В частности, исследованы динамические модели процессов, наблюдаемых в сложных социальных сетевых системах, структурные характеристики таких сетей и их взаимосвязь с наблюдаемыми динамическими процессами, в т.ч. с использованием теории построения динамических графов. Кроме того, в обзоре проанализировано применение нейронных сетей для прогнозирования эволюции динамических процессов, наблюдаемых в сложных социальных системах, и их структуры (например, как изменяется активность, число пользователей и структура их связей в социальных сетевых сообществах). Значительное внимание в обзоре уделено применению методов компьютерной лингвистики, что необходимо для извлечения знаний из текстовых сообщений пользователей социальных сетей при создании моделей, описывающих наблюдаемые процессы.

Такие исследования позволяют прогнозировать не только динамику общественных процессов (изменение социальных настроений), но и тенденции социально-экономического развития за счет мониторинга мнений пользователей по важным экономическим и социальным вопросам, как на уровне отдельных территориальных образований, так и на уровне регионов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-21-00109 «Разработка моделей прогнозирования динамики социальных настроений на основе анализа временных рядов текстового контента социальных сетей с использованием уравнений Фоккера – Планка и нелинейной диффузии».

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-21-00109 “Development of the dynamics forecasting models of social moods

based on the analysis of text content time series of social networks using the Fokker–Planck and nonlinear diffusion equations.”

Вклад авторов

Ю.П. Перова – сбор и анализ информации для обзора.

В.Р. Григорьев – обработка материалов для обзора.

Д.О. Жуков – концептуальная идея и обсуждение полученных результатов.

Authors' contributions

J.P. Perova – collection and analysis of information for the review.

V.R. Grigoriev – processing of materials for the review.

D.O. Zhukov – conceptual idea and discussion of the obtained results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Губанов Д.А., Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. *Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства*. М.: Изд-во МЦНМО; 2018. 223 с. ISBN 978-5-4439-1302-5 [Gubanov D.A., Novikov D.A., Chkhartishvili A.G. *Sotsial'nye seti: modeli informatsionnogo vliyaniya, upravleniya i protivoborstva (Social networks: models of informational influence, management and confrontation)*. Moscow: MTsNMO; 2018. 223 p. ISBN 978-5-4439-1302-5 (in Russ.).]
2. Батура Т.В. Методы анализа компьютерных сетей. *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии*. 2012;10(4):13–28. URL: <https://lib.nsu.ru/xmlui/handle/nsu/250> [Batura T.V. Methods of social networks analysis. *Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnye tekhnologii = Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2012;10(4):13–28 (in Russ.). Available from URL: <https://lib.nsu.ru/xmlui/handle/nsu/250>]
3. Pasa L., Navarin N., Sperdut A. SOM-based aggregation for graph convolutional neural networks. *Neural Comput. & Applic.* 2022;34(1):5–24. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05484-4>
4. Zhukov D.O., Akimov D.A., Red'kin O.K., Los' V.P. Application of convolutional neural networks for preventing information leakage in open internet resources. *Aut. Control Sci.* 2017;51(8):888–893. <https://doi.org/10.3103/S0146411617080314>
5. Zhang Z., Wu S., Jiang D., Chen G. BERT-JAM: Maximizing the utilization of BERT for neural machine translation. *Neurocomputing*. 2021;460:84–94. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.07.002>
6. Маккинли У. *Python и анализ данных*: пер. с англ. М.: ДМК Пресс; 2020. 540 с. ISBN 978-5-94074-590-5 [McKinney W. *Python i analiz dannykh (Python and Data Analysis)*: transl. from Eng. Moscow: DMK Press; 2020. 540 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94074-590-5] [McKinney W. *Python for Data Analysis*: 2nd ed. US: O'Reilly Media, Inc.; 2017. 541 p. ISBN 978-1-491-95766-0. Available from URL: <https://www.programmerbooks.com/wp-content/uploads/2019/04/Python-for-Data-Analysis-2nd-Edition.pdf>]

7. Николенко С., Кадури А., Архангельская Е. *Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей*. СПб.: Питер; 2021. 476 с. ISBN 978-5-4461-1537-2.
[Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangel'skaya E. *Glubokoe obuchenie. Pogruzhenie v mir neuronnykh setei (Deep Learning. Immersion in the World of Neural Networks)*. St. Petersburg: Piter; 2021. 476 p. (in Russ.). ISBN 978-5-4461-1537-2]
8. Кан К. *Нейронные сети. Эволюция*. ЛитРес; 2018. 380 с.
[Kan K. *Neironnye seti. Evolyutsiya (Neural Networks. Evolution)*. LitRes; 2018. 380 p. (in Russ.).]
9. Рашид Т. *Создаем нейронную сеть*: пер. с англ. СПб.: ООО «Альфа-книга»; 2017. 272 с. ISBN 978-5-9909445-7-2
[Rashid T. *Sozdaem neironnyuyu set' (Make Your Own Neural Network)*: transl. from Eng. St. Petersburg: Al'fa-kniga; 2017. 272 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9909445-7-2]
[Rashid T. *Make Your Own Neural Network*. 1st ed. CreateSpace Independent Publishing Platform; 2016. 222 p. ISBN-13 [978-1530826605]
10. Галушкин А.И. *Нейронные сети: основы теории*. М.: Горячая линия-Телеком; 2012. 496 с. ISBN 978-5-9912-0082-0
[Galushkin A.I. *Neironnye seti: osnovy teorii (Neural Networks: Fundamentals of Theory)*. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom; 2012. 496 p. (in Russ.).]
11. Савельев А.В. Философия методологии нейромоделирования: смысл и перспективы. *Философия науки*. 2003;1(16):46–59.
[Savel'ev A.V. The philosophy of methodology of neuro-modeling: Sense and prospects. *Filosofiya nauki = Philosophy of Sciences*. 2003;1(16):46–59 (in Russ.).]
12. Алексеев А.Ю., Кузнецов В.Г., Петрунин Ю.Ю., Савельев А.В., Янковская Е.А. Нейрофилософия как концептуальная основа нейрокомпьютинга. *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2015;5:69–77.
[Alekseev A.Yu., Kuznetsov V.G., Petrunin Yu.Yu., Savel'ev A.V., Yankovskaya E.A. Neurophilosophy as a conceptual basis for neurocomputing. *Neirokomp'yutery: razrabotka, primenenie = Neurocomputers: Development, Application*. 2015;5:69–77 (in Russ.).]
13. Sekara V., Stopczynski A., Lehmann S. Fundamental structures of dynamic social networks. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*. 2016;113(36):9977–9982. <https://doi.org/10.1073/pnas.1602803113>
14. Ubaldi E., Vezzani A., Karsai M., Perra N., Burioni R. Burstiness and tie activation strategies in time-varying social networks. *Sci. Rep.* 2017;7:46225. <https://doi.org/10.1038/srep46225>
15. Palomares I., Porcel C., Pizzato L., Guy I., Herrera-Viedma E. Reciprocal recommender systems: analysis of state-of-art literature, challenges and opportunities towards social recommendation. *Information Fusion*. 2021;69(16):103–127. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2020.12.001>
16. Yatim Md.A.F., Wardhana Y., Kamal A., Soroina A.A.R., Rachim F., Wonggo M.I. A corpus-based lexicon building in Indonesian political context through Indonesian online news media. In: *2016 International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems (ICACSIS)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICACSIS.2016.7872794>
17. Kim S.L., Hinders M.K. Dynamic wavelet fingerprint for differentiation of tweet storm types. *Soc. Netw. Anal. Min.* 2020;10(1):4. <https://doi.org/10.1007/s13278-019-0617-3>
18. Karami A., Elkouri A. Political Popularity Analysis in Social Media. In: Taylor N., Christian-Lamb C., Martin M., Nardi B. (Eds.). *Information in Contemporary Society*. Part of: *Lecture Notes in Computer Science* (including subseries *Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics*). 2019. V. 11420. P. 456–465. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15742-5_44
19. Belcastro L., Cantini R., Marozzo F., Talia D., Trunfi P. Learning political polarization on social media using neural networks. *IEEE Access*. 2020;8:47177–47187. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2978950>
20. Vijayaraghavan P., Vosoughi S., Roy D. Twitter demographic classification using deep multi-modal multi-task learning. In: *Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. 2017;2(Short Papers):478–483. <https://doi.org/10.18653/v1/P17-2076>
21. Preoțiu-Pietro D., Liu Y., Hopkins D., Ungar L. Beyond binary labels: political ideology prediction of Twitter users. In: *Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. 2017;1(Long Papers):729–740. <https://doi.org/10.18653/v1/P17-1068>
22. Hinds J., Joinson A.N. What demographic attributes do our digital footprints reveal? A systematic review. *PLoS One*. 2018;13(11):e0207112. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207112>
23. Garcia D. Leaking privacy and shadow profiles in online social networks. *Sci. Adv.* 2017;3(8):e1701172. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701172>
24. Pandya A., Oussalah M., Monachesi P., Kostakos P. On the use of distributed semantics of tweet metadata for user age prediction. *Future Generation Computer Systems*. 2020;102(5915):437–452. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.08.018>
25. Pulipati S., Somula R., Parvathala B.R. Nature inspired link prediction and community detection algorithms for social networks: a survey. *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.* 2021. <https://doi.org/10.1007/s13198-021-01125-8>
26. Li H., Mao X., Wu C., Yang F. Design and analysis of a general data evaluation system based on social networks. *EURASIP J. Wireless Com. Network*. 2018;1:109. <https://doi.org/10.1186/s13638-018-1095-4>
27. Xu F., Sun D., Li Z., Li B. Research on online supporting community of extreme organization by AI-SNA based method. In: *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Sciences (ICSESS)*. 2018. V. 2017. P. 546–551. <https://doi.org/10.1109/ICSESS.2017.8342974>
28. Volkova S., Bachrach Y., Van Durme B. Mining user interests to predict perceived psycho-demographic traits on Twitter. In: *2016 IEEE Second International Conference on Big Data Computing Service and Applications (BigDataService)*. IEEE. 2016. P. 36–43. <https://doi.org/10.1109/BigDataService.2016.28>
29. Culotta A., Ravi N.K., Cutler J. Predicting Twitter user demographics using distant supervision from website traffic data. *J. Artif. Intell. Res.* 2016;55:389–408. <https://doi.org/10.1613/jair.4935>

30. Barberá P. Less is more? How demographic sample weights can improve public opinion estimates based on Twitter data. *Working Paper*. Available from URL: <http://pablobarbera.com/static/less-is-more.pdf>
31. Ardehaly E.M., Culotta A. Learning from noisy label proportions for classifying online social data. *Soc. Netw. Anal. Min.* 2018;8:2. <https://doi.org/10.1007/s13278-017-0478-6>
32. Franco-Riquelme J.N., Bello-García A., Ordieres-Meré J. Indicator proposal for measuring regional political support for the electoral process on Twitter: The case of Spain's 2015 and 2016 general elections. *IEEE Access.* 2019;7:62545–62560. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2917398>
33. Jungherr A., Schoen H., Posegga O., Jürgens P. Digital trace data in the study of public opinion: an indicator of attention toward politics rather than political support. *Soc. Sci. Comput. Rev.* 2016;35(3):336–356. <https://doi.org/10.1177/0894439316631043>
34. Mwanza S., Suleman H. Measuring network structure metrics as a proxy for socio-political activity in social media. In: *IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW)*. IEEE. 2017. P. 878–883. <https://doi.org/10.1109/ICDMW.2017.120>
35. Al-Agha I., Abu-Dahrooj O. Multi-level analysis of political sentiments using Twitter data: A case study of the Palestinian-Israeli conflict. *Jordanian Journal of Computers and Information Technology.* 2019;5(3): 195–215. <https://doi.org/10.5455/jcit.71-1562700251>
36. Basil M., Gaikwad S., Salim A.S. Deep learning approach based dominant age group based classification for social network. In: Khalaf M., Al-Jumeily D., Lisitsa A. (Eds.). *Applied Computing to Support Industry: Innovation and Technology. ACRIT 2019. Communications in Computer and Information Science.* 2020;1174:148–156. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38752-5_12
37. Guimaraes R., Renata R., De Gaetano D., Rodriguez D.Z., Bressan G. Age groups classification in social network using deep learning. *IEEE Access.* 2017;5:10805–10816. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2706674>
38. Bhat S.F., Lone A.W., Dar T.A. Gender prediction from images using deep learning techniques. In: *2019 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*. IEEE. 2019. <https://doi.org/10.1109/IDAP.2019.8875934>
39. Bulut İ., Erdoğan M., Gönülal B., Baş R., Kılıç Ö. Using short texts and emojis to predict the gender of a texter in Turkish. In: *2019 4th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)*. IEEE. 2019. P. 435–438. <https://doi.org/10.1109/UBMK.2019.8907198>
40. Dileep M.R., Danti A. Multiple hierarchical decision on neural network to predict human age and gender. In: *2016 International Conference on Emerging Trends in Engineering, Technology and Science (ICETETS)*. IEEE. 2016. <https://doi.org/10.1109/ICETETS.2016.7603026>
41. Gupta R., Kumar S., Yadav P., Shrivastava S. Identification of age, gender, & race SMT (scars, marks, tattoos) from unconstrained facial images using statistical techniques. In: *2018 International Conference on Smart Computing and Electronic Enterprise (ICSCEE)*. IEEE. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICSCEE.2018.8538423>
42. Khdr J., Varol C. Age and gender identification by SMS text messages. In: *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)*. IEEE. 2018. <https://doi.org/10.1109/IDAP.2018.8620780>
43. Koti P., Pothula S., Dhavachelvan P. Age forecasting analysis – over microblogs. In: *2017 Second International Conference on Recent Trends and Challenges in Computational Models (ICRTCCM)*. IEEE. 2017. P. 83–86. <https://doi.org/10.1109/ICRTCCM.2017.38>
44. López-Santamaría L.-M., Almanza-Ojeda D.-L., Gomez J.C., Ibarra-Manzano M. Age and gender identification in unbalanced social media. In: *2019 International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP)*. IEEE. 2019. <https://doi.org/10.1109/CONIELECOMP.2019.8673125>
45. Luo F., Cao G., Mulligan K., Li X. Explore spatiotemporal and demographic characteristics of human mobility via Twitter: A case study of Chicago. *Applied Geography.* 2015;70(3):11–25. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.03.001>
46. Sánchez-Hevia H.A., Gil-Pita R., Utrilla-Manso M., Rosa-Zurera M. Convolutional-recurrent neural network for age and gender prediction from speech. In: *2019 Signal Processing Symposium (SPSymposium)*. IEEE. 2019. P. 242–245. <https://doi.org/10.1109/SPS.2019.8881961>
47. Wang Y., Song W., Liu L. Age prediction based on feature selection. In: *2017 2nd IEEE International Conference on Computational Intelligence and Applications (ICCI)*. IEEE. 2017. P. 359–363. <https://doi.org/10.1109/CIAPP.2017.8167239>
48. Pandya A., Oussalah M., Monachesi P., Kostakos P., Lovén L. On the use of URLs and hashtags in age prediction of Twitter users. In: *2018 IEEE International Conference on Information Reuse and Integration (IRI)*. IEEE. 2018. P. 62–69. <https://doi.org/10.1109/IRI.2018.00017>
49. Zhukov D.O., Zaltzman A.D., Khvatova T.Yu. Forecasting changes in states in social networks and sentiment security using the principles of percolation theory and stochastic dynamics. In: *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS)*. IEEE. 2019. Article number 8928295. P. 149–153. <https://doi.org/10.1109/ITQMIS.2019.8928295>
50. Mukhamediev R.I., Yakunin K., Mussabayev R., Buldybayev T., Kuchin Y., Murzakhmetov S., Yelis M. Classification of negative information on socially significant topics in mass media. *Symmetry.* 2020;12(12):1945. <https://doi.org/10.3390/sym12121945>
51. Ko H., Jong Y., Sangheon K., Libor M. Human-machine interaction: A case study on fake news detection using a backtracking based on a cognitive system. *Cogn. Syst. Res.* 2019;55:77–81. <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2018.12.018>
52. Willaert T., Van Eecke P., Beuls K., Steels L. Building social media observatories for monitoring online opinion dynamics. *Soc. Media Soc.* 2020;6(2):205630511989877.
53. Tran C., Shin W.-Y., Spitz A. Community detection in partially observable social networks. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data.* 2022;16(2):1–24. <https://doi.org/10.1145/3461339>

54. Chen Z., Li L., Bruna J. Supervised community detection with line graph neural networks. In *Proceedings of the 7th International Conference on Learning Representations (ICLR)*. ACM. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.08415>
55. Hoffmann T., Peel L., Lambiotte R., Jones N.S. Community detection in networks without observing edges. *Sci. Adv.* 2020;6(4):eaav1478. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav1478>
56. Башуев Я.П., Григорьев В.Р. Методы деанонимизации в социальных сетях. *Вестник РГГУ. Серия: Документоведение и архивоведение. Информатика. Защита информации и информационная безопасность.* 2016;3(5):125–146. URL: [https://www.rsuh.ru/upload/main/vestnik/pmorv/Vestnik_daizi3\(5\)-16.pdf#page=125](https://www.rsuh.ru/upload/main/vestnik/pmorv/Vestnik_daizi3(5)-16.pdf#page=125) [Bashuev Ya., Grigorjev V. Social nets deanonimization methods. *Vestnik RGGU. Seriya Dokumentovedenie i arkhivovedenie. Informatika. Zashchita informatsii i informatsionnaya bezopasnost' = RGGU BULLETIN. Series: Records Management and Archival Studies. Computer Science. Data Protection and Information Security.* 2016;3(5):125–146 (in Russ.). Available from URL: [https://www.rsuh.ru/upload/main/vestnik/pmorv/Vestnik_daizi3\(5\)-16.pdf#page=125](https://www.rsuh.ru/upload/main/vestnik/pmorv/Vestnik_daizi3(5)-16.pdf#page=125)]
57. Wondracek G., Holz T., Kirda E., Kruegel C. A practical attack to de-anonymize social network users. *Technical Report TR-iSecLab-0110-001*. 2013. Available from URL: <https://anonymous-proxy-servers.net/paper/sonda-tr.pdf>
58. Simon B., Gulyás G., Imre S. Analysis of grasshopper, a novel social network de-anonymization algorithm. *Periodica Polytechnica: Electrical Engineering and Computer Science.* 2014;58(4):161–173. <https://doi.org/10.3311/PPee.7878>
59. Peng W., Li F., Zou X., Wu J. A two-stage deanonymization attack against anonymized social networks. *IEEE Trans. Comp.* 2014;63(2):290–303. <https://doi.org/10.1109/TC.2012.202>
60. Khvatova T., Zaltsman A., Zhukov D. Information processes in social networks: Percolation and stochastic dynamics. In: *CEUR Workshop. Proceedings 2nd International Scientific Conference "Convergent Cognitive Information Technologies."* 2017;1–2064: 277–288.
61. Zhukov D., Khvatova T., Zaltsman A. Stochastic dynamics of influence expansion in social networks and managing users' transitions from one state to another. In: *Proceedings of the 11th European Conference on Information Systems Management (ECISM)*. 2017. P. 322–329. Available from URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85039839600&partnerID=MN8TOARS>

Об авторах

Перова Юлия Петровна, старший преподаватель кафедры телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: perova_yu@mirea.ru. Scopus Author ID 57431908700, <https://orcid.org/0000-0003-4028-2842>

Григорьев Виталий Робертович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Информационное противоборство» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: grigorev@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 4088-0403.

Жуков Дмитрий Олегович, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Информационное противоборство» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: zhukov_do@mirea.ru. Scopus Author ID 57189660218, SPIN-код РИНЦ 1798-8891.

About the authors

Julia P. Perova, Senior Lecturer, Department of Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: perova_yu@mirea.ru. Scopus Author ID 57431908700, <https://orcid.org/0000-0003-4028-2842>

Vitaly P. Grigoriev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Information Warfare, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: grigorev@mirea.ru. RSCI SPIN-code 4088-0403

Dmitry O. Zhukov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Information Warfare, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: zhukov_do@mirea.ru. Scopus Author ID 57189660218, RSCI SPIN-code 1798-8891

УДК 535.015
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-50-57>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Повышение эффективности оптико-терагерцового преобразователя за счет профилированных сапфировых волокон

Н.В. Зенченко^{1, 2, 3, @},
Д.В. Лаврухин^{1, 2},
И.А. Глинский^{1, 2, 3},
Д.С. Пономарев^{1, 2}

¹ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова
Российской академии наук, Москва, 117105 Россия

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, 119991 Россия

³ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: zenchenko.nikolay@yandex.ru

Резюме

Цели. Цель работы – повышение эффективности фотопроводящего ТГц-излучателя большой площади на основе оптико-терагерцового преобразователя (ОТП) (излучающая область составляет $0.3 \times 0.3 \text{ мм}^2$) для генерации мощного ТГц-излучения с помощью применения в качестве фокусирующей оптики массива плотноупакованных профилированных сапфировых волокон диаметром в диапазоне 100–300 мкм.

Методы. В качестве фотопроводящей подложки использовался полубесконечный слой LT-GaAs (LT, low-temperature grown GaAs – слой GaAs, выращиваемый методом молекулярно-лучевой эпитаксии при пониженной температуре роста). Далее следуют слои Si_3N_4 и Al_2O_3 для снижения токов утечки в OTP и уменьшения отражения импульса лазерной накачки от границы «воздух/полупроводник» (френелевские потери) соответственно. Ширина зазора составляет 10 мкм, система металлов Ti/Au используется для формирования электродов антенны и подводных полосков. Моделирование проводилось методом конечных элементов в среде *COMSOL Multiphysics*.

Результаты. Продемонстрирована способность профилированного сапфирового волокна после оптимизации диаметра относительно параметров зазора значительно увеличить концентрацию носителей заряда в непосредственной близости к электродам OTP. Определена интегральная эффективность фотопроводящего ТГц-излучателя большой площади с учетом микрополосковой топологии массива с характерным размером подводных полосков, пропорциональным ширине зазора в OTP, и с верхним (маскирующим) металлическим слоем. Максимальная локализация электромагнитного поля в непосредственной близости к краям электродов на интерфейсе «волокно/полупроводник» достигается при диаметре профилированного сапфирового волокна, равном 220 мкм.

Выводы. Путем оптимизации диаметра сапфирового волокна продемонстрирована возможность увеличения в ~40 раз локализации падающих электромагнитных волн в непосредственной близости к краям электродов OTP по сравнению со случаем без волокна, а также повышение до ~7–10 раз общей эффективности излучателя большой площади.

Ключевые слова: терагерцовая импульсная спектроскопия, источники и детекторы ТГц-излучения, субволновая фокусировка излучения, терагерцовые оптические элементы и системы, оптико-терагерцовая конверсия, металинза

• Поступила: 20.05.2022 • Доработана: 07.10.2022 • Принята к опубликованию: 27.01.2023

Для цитирования: Зенченко Н.В., Лаврухин Д.В., Глинский И.А., Пономарев Д.С. Повышение эффективности оптико-терагерцового преобразователя за счет профилированных сапфировых волокон. *Russ. Technol. J.* 2023;11(2):50–57. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-50-57>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Improving the efficiency of an optical-to-terahertz converter using sapphire fibers

Nikolay V. Zenchenko^{1, 2, 3, @},
Denis V. Lavrukhin^{1, 2},
Igor A. Glinskiy^{1, 2, 3},
Dmitry S. Ponomarev^{1, 2}

¹ V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117105 Russia

² Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

³ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: zenchenko.nikolay@yandex.ru

Abstract

Objectives. The study aims to improve the efficiency of a large-area photoconductive terahertz (THz) emitter based on an optical-to-terahertz converter (OTC) having a radiating area of $0.3 \times 0.3 \text{ mm}^2$ for generating high-power THz radiation by using an array of close-packed profiled sapphire fibers having a diameter in the range of 100–300 μm as focusing optics.

Methods. As a photoconductive substrate, we used a semi-infinite LT-GaAs layer (low-temperature grown GaAs; GaAs layer grown by molecular beam epitaxy at a low growth temperature). Additional Si_3N_4 and Al_2O_3 layers are intended for reducing leakage currents in the OTC and reducing the reflection of the laser pump pulse from the air/semiconductor interface (Fresnel losses), respectively, at a gap width of 10 μm . For forming the antenna electrodes and feed strips, the Ti/Au metal system was used. The simulation was carried out by the finite element method in the COMSOL Multiphysics environment.

Results. The use of a profiled sapphire fiber whose diameter has been optimized with respect to the gap parameters to significantly increase the concentration of charge carriers in the immediate vicinity of the electrodes of an OTC is demonstrated. The integrated efficiency of a large-area photoconductive THz emitter was determined taking into account the microstrip topology of the array with a characteristic size of feed strips proportional to the gap width in the OTC and with the upper (masking) metal layer. The maximum localization of the electromagnetic field in close proximity to the edges of electrodes at the “fiber–semiconductor” interface is achieved with a profiled sapphire fiber diameter of 220 μm .

Conclusions. By optimizing the diameter of the sapphire fiber, the possibility of improving the localization of incident electromagnetic waves in close proximity to the edges of the OTC electrodes by ~40 times compared to the case without fiber, as well as increasing the overall efficiency of a large-area emitter by up to ~7–10 times, was demonstrated.

Keywords: pulsed terahertz spectroscopy, emitters and detectors of THz radiation, subwavelength radiation, terahertz optical elements and systems, optical-to-terahertz conversion, metalens

• Submitted: 20.05.2022 • Revised: 07.10.2022 • Accepted: 27.01.2023

For citation: Zenchenko N.V., Lavrukhin D.V., Glinskiy I.A., Ponomarev D.S. Improving the efficiency of an optical-to-terahertz converter using sapphire fibers. *Russ. Technol. J.* 2023;11(2):50–57. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-50-57>

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 оптико-терагерцовые преобразователи (ОТП) широко используются в системах терагерцовой (ТГц) спектроскопии для генерации и детектирования широкополосного ТГц-излучения [1]. Благодаря «гибкости» в технологии их изготовления (возможности вариации топологии и геометрии электродов антенны, а также выбора фотопроводящего (полупроводникового) материала), ОТП представляют значительный интерес для создания систем одноканального и многоканального детектирования для визуализации (имиджинга) объектов в ТГц-диапазоне [2, 3].

Однако эффективность работы ОТП-излучателей ограничена тем, что лишь малая доля энергии импульса лазерной накачки преобразуется в электромагнитные колебания ТГц-диапазона [4, 5]. Одним из методов повышения эффективности является структурирование краев электродов путем формирования периодических металлических (плазмонных) наноструктур в зазоре антенны [4–7]. В противовес плазмоники альтернативным подходом является применение диэлектрических структур. Они не подвержены омическим потерям и перегреву с выделением Джоулева тепла, позволяют сфокусировать лазерный импульс и сформировать локальные каустики [8–10]. Локализация оптического излучения может значительно (примерно в 7 раз) повысить эффективность передачи энергии накачки в фотопроводящий слой и увеличить эффективность генерации ТГц-излучения путем увеличения плотности фототока [6]. В настоящей работе показано, каким образом можно добиться данного эффекта, используя линзы на основе профилированных сапфировых волокон (ПСВ) диаметром 100–300 мкм. Подобные волокна позволяют сфокусировать значительное количество энергии вдоль всей поверхности электродов фотопроводящего ТГц-излучателя [7].

Ранее мы теоретически показали [10], что подобное волокно позволяет сформировать субволновые локальные каустики (области максимальной концентрации носителей заряда) на границе с полупроводником. Благодаря высокому показателю преломления сапфира в широком диапазоне электромагнитного спектра [11] можно создать значительный оптический контраст на интерфейсе «волоконно-полупроводник», что позволяет локализовать фотовозбужденные носители заряда принципиально вблизи электродов ОТП (при оптимальном диаметре волокна). Локализация (фокусировка) приводит к повышению эффективности передачи энергии накачки в фотопроводник и сопровождается увеличением мощности генерации ТГц-излучения благодаря увеличению плотности фототока [12].

МОДЕЛИРОВАНИЕ

В данной работе предлагается концепция фотопроводящего ТГц-излучателя большой площади на основе ОТП (излучающая область составляет 0.3×0.3 мм²) для генерации мощного ТГц-излучения, где в качестве фокусирующей оптики используется массив плотно упакованных ПСВ диаметром в диапазоне 100–300 мкм, производства Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (Россия). Модель ОТП, а также поперечный срез структуры, приведены на рис. 1, где d – диаметр ПСВ, g – размер зазора между электродами, a – диаметр пучка импульсной лазерной накачки.

ОТП был создан в Институте сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), Россия. Структура ОТП представляла собой последовательность полупроводниковых и диэлектрических слоев. В качестве фотопроводящей подложки использовался слой LT-GaAs (LT, low-temperature grown GaAs – слой GaAs, выращенный методом

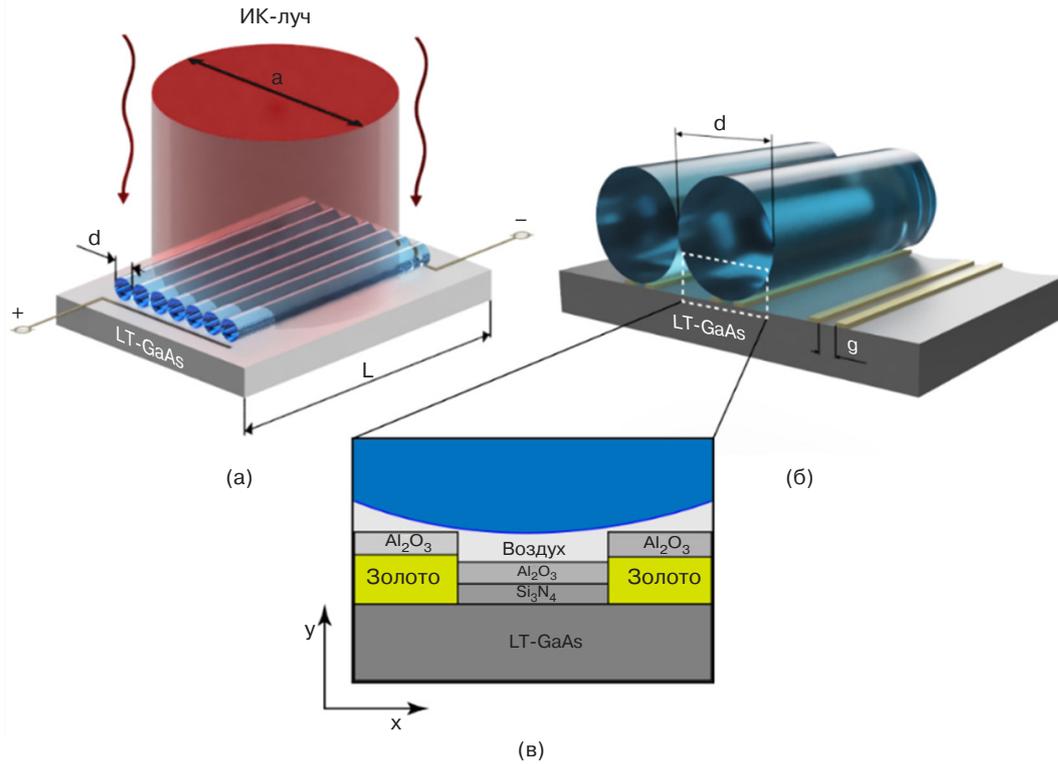


Рис. 1. Модель ОТП (а); увеличенное изображение элемента ОТП с фокусирующей оптикой на основе ПСВ (б); поперечное сечение (в)

молекулярно-лучевой эпитаксии при пониженной температуре роста). Далее следовали слои Si₃N₄ и Al₂O₃ для снижения токов утечки в ОТП и уменьшения френелевского отражения лазерной накачки от границы «воздух/полупроводник» соответственно. Ширина зазора составляла 10 мкм. Для формирования электродов антенны и подводящих полосок использовалось золото. Все технологические процедуры (в частности, нанесение Si₃N₄, Al₂O₃ и золота) производились в ИСВЧПЭ РАН. Далее на основе полученной подложки создавался ОТП.

Электромагнитный расчет проводился методом конечных элементов в программной среде *COMSOL Multiphysics*¹. Размеры ячеек конечно-элементной сетки варьировались от $\lambda/8$ для области зазора до $\lambda/4$ для остальных областей (λ – длина волны импульса лазерной накачки, в расчетах $\lambda = 780$ и 1560 нм). Стоит отметить, что полученные распределения электромагнитных полей для обеих длин волн почти не отличаются вследствие того, что оптические свойства (в частности, показатель преломления) образцов ПСВ имеют различия только во втором знаке после запятой. Вектор распространения электрического поля импульса лазерной накачки ориентирован по нормали к поверхности ОТП. Мы использовали параметр (x/g) , где x – латеральная

координата, чтобы сделать решение безразмерным и масштабировать результаты моделирования для различных диаметров ПСВ (d) и размеров зазора (g). Результаты моделирования пространственного распределения квадрата электрического поля электромагнитной волны (ЭМВ) для трех различных значений $d/g = 14, 18$ и 22 приведены на рис. 2.

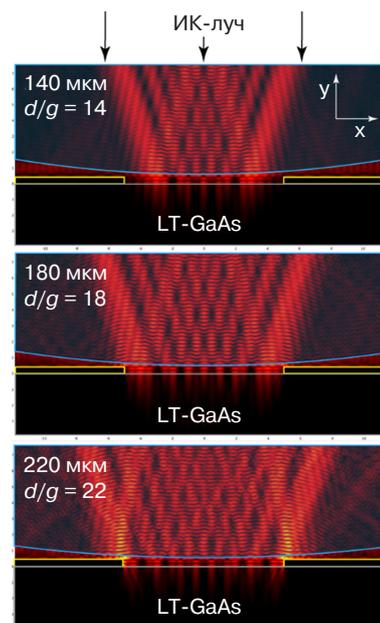


Рис. 2. Распределение ЭМВ для различных значений параметра d/g

¹ <https://www.comsol.ru/>. Дата обращения 01.02.2022. / Accessed February 01, 2022 (in Russ.).

На картинах распределения ЭМВ отчетливо видны субволновые каустики (характерные области максимальной локализации поля лазерной накачки в полупроводнике), формируемые вблизи электродов ОТП. Также видно, что размер каустики увеличивается по мере увеличения соотношения (d/g) и достигает своего максимума (другими словами, максимальной локализации энергии импульса лазерной накачки) при значении $d/g = 22$.

Для качественной оценки числа фотовозбужденных носителей заряда, которые могут достигнуть электродов ОТП до их рекомбинации в полупроводнике, мы проинтегрировали интенсивность электромагнитного поля в области зазора ОТП следующим образом:

$$I = \int_{-g/2}^{g/2} |E^2(x)| \exp(-(|x - g/2|)/r_d) dx,$$

где r_d характеризует дрейфовую длину для носителей заряда. Типичные значения $r_d = 100, 300$ и 500 нм были выбраны, исходя из характерных значений насыщенных скоростей и времен жизни носителей в LT-GaAs [13, 14].

Далее, для количественной оценки степени локализации импульса лазерной накачки в зазоре ОТП мы ввели коэффициент увеличения интенсивности ЭМВ (K), который определяется соотношением между интегралами I_s и I_0 , где I_s рассчитывается для случая ОТП с ПСВ, а I_0 – без него. Результаты моделирования приведены на рис. 3.

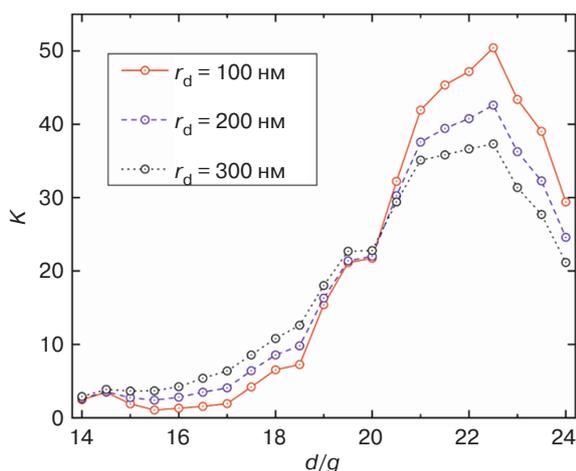


Рис. 3. Коэффициент увеличения интенсивности ЭМВ в зазоре

Видно, что все три кривые (соответствующие разным значениям r_d) сохраняют свою форму, что подтверждает корректность расчета, а величина коэффициента K монотонно растет с увеличением параметра d/g , достигая своего максимума ~ 40 при

$d/g = 22$. Важно отметить, что данное значение характеризует случай, когда субволновые каустики располагаются строго у краев электродов ОТП, позволяя тем самым большему числу фотовозбужденных носителей заряда внести вклад в генерацию ТГц-излучения. Последнее, в свою очередь, приведет к увеличению генерируемого ОТП фототока и потенциально повысит эффективность оптико-ТГц-преобразования.

На основе полученных результатов расчета, интегральная эффективность K фотопроводящего ТГц-излучателя большой площади с учетом микрополосковой топологии массива с характерным размером подводящих полосков, пропорциональным ширине зазора в ОТП, и с верхним (маскирующим) металлическим слоем может быть оценена как:

$$K \sim I_s(a/d)/I_0(a/4g) = 4K(d/g)/(d/g),$$

где параметр a характеризует типичный диаметр пятна импульса лазерной накачки (1.0–1.5 мм), а цифра 4 соответствует периоду микрополосковой структуры массива, состоящей из двух фотопроводящих зазоров и двух ширин подводящих полосков.

Также нужно отметить пути возможной оптимизации конструкции ТГц-излучателя большой площади с применением ПСВ. Как было показано на рис. 1а, лазерный пучок покрывает $n = a/d$ волокон. Для увеличения мощности ТГц-генерации излучения логично уменьшить как диаметр ПСВ, так и размер зазора. Однако уменьшение зазора эквивалентно резкому возрастанию напряженности электрического поля вследствие уменьшения расстояния между двумя соседними металлическими полосками. Это сильно повышает вероятность электрического пробоя в LT-GaAs (и тем более в фотопроводниках для накачки ИК лазерным излучением – с относительно малой шириной запрещенной зоны, например InGaAs). Другими словами, «нижние» граничные значения для d и g на практике составят: $g \sim 3\text{--}5$ мкм, $d \sim 100$ мкм. Кроме того, любое уменьшение ширины зазора накладывает дополнительные требования на точность совмещения ПСВ с поверхностью образца ОТП. По нашим оценкам, число расположенных по соседству излучающих элементов с микрополосковой топологией для ТГц-излучателя большой площади не должно превышать 10. В таком случае комбинация «ОТП + ПСВ» должна работать максимально эффективно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложено использовать массив линз из сапфирового волокна для увеличения эффективности работы фотопроводящего ТГц-излучателя

большой площади. С помощью численного моделирования показано, что каждая линза обеспечивает пространственное перераспределение плотности фотовозбужденных носителей заряда в зазоре между электродами единичной антенны. Путем оптимизации диаметра сапфирового волокна продемонстрирована возможность увеличения локализации падающих ЭМВ в непосредственной близости к краям электродов ОТП в ~ 40 раз по сравнению со случаем без волокна, а также повышение до ~ 7 – 10 раз общей эффективности излучателя большой площади.

Стоит отметить, что на практике падающий лазерный луч имеет диаметр 1.0–1.5 мм. Таким образом, при $d = 220$ мкм и $g = 10$ мкм число пар полосковых линий на кристалле ТГц-излучателя большой площади будет около 5. Поэтому для повышения производительности ТГц-излучателя большой площади можно использовать 10 пар полосковых линий с зазором 5 мкм ($d = 110$ мкм).

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РТУ МИРЭА «Инновации в реализации приоритетных направлений развития науки и технологий». Модель образца ОТП была предложена в рамках гранта Российского научного фонда

№ 18-79-10195, а работы по численному моделированию проводились при поддержке гранта Фонда содействия инновациям № 16298ГУ/2021.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was supported by the RTU MIREA grant (Innovations in the Implementation of Priority Areas for the Development of Science and Technology). The design on an OTC was developed within the Russian Scientific Foundation grant No. 18-79-10195 while the simulations were supported by the Fund for Assistance to Small Innovative Enterprises, grant No. 16298GU/2021.

Вклад авторов

Н.В. Зенченко – численное моделирование ОТП.
Д.В. Лаврухин – разработка методики вычисления коэффициента увеличения интенсивности ЭМВ в ОТП.

И.А. Глинский – численное моделирование ОТП.

Д.С. Пономарев – руководство проектом.

Authors' contributions

N.V. Zenchenko – numerical simulation of OTC.

D.V. Lavrukhin – methodology for calculating the enhancement coefficient for the intensity of the EMW in the OTC.

I.A. Glinskiy – numerical simulation of OTC.

D.S. Ponomarev – project management.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Yachmenev A.E., Pushkarev S.S., Reznik R.R., Khabibullin R.A., Ponomarev D.S. Arsenides-and related III-V materials-based multilayered structures for terahertz applications: Various designs and growth technology. *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.* 2020;66(2):100485. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2020.100485>
2. Gueroboukha H., Nallappan K., Skorobogatiy M. Toward real-time terahertz imaging. *Adv. Opt. Photonics.* 2018;10(4):843–938. <https://doi.org/10.1364/AOP.10.000843>
3. Henri R., Nallappan K., Ponomarev D.S., Gueroboukha H., Lavrukhin D.V., Yachmenev A.E., Khabibullin R.A., Skorobogatiy M. Fabrication and characterization of an 8×8 terahertz photoconductive antenna array for spatially resolved time domain spectroscopy and imaging applications. *IEEE Access.* 2021;9:117691–117702. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3106227>
4. Yachmenev A.E., Lavrukhin D.V., Glinskiy I.A., Zenchenko N.V., Goncharov Y.G., Spektor I.E., Khabibullin R.A., Otsuji T., Ponomarev D.S. Metallic and dielectric metasurfaces in photoconductive terahertz devices: a review. *Optical Engineering.* 2019;59(6):061608 (19 p.). <https://doi.org/10.1117/1.OE.59.6.061608>
5. Yardimci N.T., Jarrahi M. Nanostructure-enhanced photoconductive terahertz emission and detection. *Small.* 2018;14(44):1802437. <https://doi.org/10.1002/smll.201802437>
6. Lepeshov S., Gorodetsky A., Krasnok A., Rafailov E., Belov P. Enhancement of terahertz photoconductive antenna operation by optical nanoantennas. *Laser & Photonics Reviews.* 2017;11(1):1600199. <https://doi.org/10.1002/lpor.201600199>
7. Castro-Camus E., Alfaro M. Photoconductive devices for terahertz pulsed spectroscopy: a review. *Photon. Res.* 2016;4(3):A36–A42. <https://doi.org/10.1364/PRJ.4.000A36>
8. Glinskiy I.A., Zenchenko N.V., Ponomarev D.S. All-dielectric metalens based on a single colloidal particle for photoconductive optical-to-terahertz switches. *Russ. Technol. J.* 2020;8(6):78–86 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-78-86>
9. Зенченко Н.В., Лаврухин Д.В., Гончаров Ю.Г., Яковлев Е.В., Зайцев К.И., Пономарев Д.С. Субдифракционные локальные каустики в ТГц антеннах с металлоповерхностями. В сб.: *XI Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники*. М.: НИЯУ МИФИ; 2020. С. 107–108. URL: <http://www.mokerov.ru/сборник-трудов-2-2020/>

- [Zenchenko N.V., Lavrukhin D.V., Goncharov Yu.G., Yakovlev E.V., Zaytsev K.I., Ponomarev D.S. Subdiffractional local caustics in THz antennas with metasurfaces. In: *The 10th International Scientific and Practical Conference on the physics and technology of nanoheterostructural microwave electronics, MOKEROV READINGS*. Moscow: NIYaU MIFI; 2020. P. 107–108 (in Russ.). Available from URL: <http://www.mokerov.ru/сборник-трудов-2-2020/>]
10. Zenchenko N.V., Lavrukhin D.V., Goncharov Yu.G., Frolov T.V., Katyba G.M., Khabibullin R.A., Zaytsev K.I., Ponomarev D.S. Фокусирующие элементы на основе профилированного сапфира для усиления генерации терагерцевого излучения. В сб.: *XII Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники*. М.: НИЯУ МИФИ; 2021. С. 101–102. URL: <http://www.mokerov.ru/сборник-трудов-4/> [Zenchenko N.V., Lavrukhin D.V., Goncharov Yu.G., Frolov T.V., Katyba G.M., Khabibullin R.A., Zaytsev K.I., Ponomarev D.S. Focusing elements based on sapphire fibers aimed at the enhancement of terahertz radiation generation. In: *The 12th International Scientific and Practical Conference on the physics and technology of nanoheterostructural microwave electronics, MOKEROV READINGS*. Moscow: NIYaU MIFI; 2021. P. 101–102 (in Russ.). Available from URL: <http://www.mokerov.ru/сборник-трудов-4/>]
 11. Katyba G., Zaytsev K., Dolganova I., Shikunova I., Chernomyrdin N., Yurchenko S., Komandin G., Reshetov I., Nesvizhevsky V., Kurlov V. Sapphire shaped crystals for waveguiding, sensing and exposure applications. *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.* 2018;64(4): 133–151. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2018.10.002>
 12. Lai W., Abdulmunem O.M., Pino P., Pelaz B., Parak W.J., Zhang Q., Zhang H. Enhanced terahertz radiation generation of photoconductive antennas based on manganese ferrite nanoparticles. *Sci. Rep.* 2017;7:46261. <https://doi.org/10.1038/srep46261>
 13. Roux J.-F., Coutaz J.-L., Krotkus A. Time-resolved reflectivity characterization of polycrystalline low-temperature-grown GaAs. *Appl. Phys. Lett.* 1999;74(17):2462. <https://doi.org/10.1063/1.123881>
 14. Liliental-Weber Z., Cheng H.J., Gupta S., Whitaker J., Nichols K., Smith F.W. Structure and carrier lifetime in LT-GaAs. *J. Electron. Mater.* 1993;22(12):1465–1469. <https://doi.org/10.1007/BF02650000>

Об авторах

Зенченко Николай Владимирович, научный сотрудник, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской академии наук (117105, Россия, Москва, Нагорный проезд, д. 7, стр. 5); научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (119991, Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 38); старший преподаватель кафедры наноэлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: zenchenko.nikolay@yandex.ru. Scopus Author ID 56891470400, ResearcherID K-2233-2015, SPIN-код РИНЦ 7667-6535, <https://orcid.org/0000-0002-7932-1821>

Лаврухин Денис Владимирович, научный сотрудник, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской академии наук (117105, Россия, Москва, Нагорный проезд, д. 7, стр. 5); научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (119991, Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 38). E-mail: denis_lavruhin@mail.ru. Scopus Author ID 55794617500, ResearcherID K-2107-2014, SPIN-код РИНЦ 4006-0978, <https://orcid.org/0000-0002-8594-7855>

Глинский Игорь Андреевич, научный сотрудник, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской академии наук (117105, Россия, Москва, Нагорный проезд, д. 7, стр. 5); научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (119991, Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 38); старший преподаватель кафедры наноэлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: glinskiy.igor@yandex.ru. Scopus Author ID 57190616854, ResearcherID I-4334-2015, SPIN-код РИНЦ 6254-0273, <https://orcid.org/0000-0002-0477-608X>

Пonomarev Дмитрий Сергеевич, к.ф.-м.н., доцент, заместитель директора по научной работе, ведущий научный сотрудник, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской академии наук (117105, Россия, Москва, Нагорный проезд, д. 7, стр. 5); ведущий научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38). E-mail: ponomarev_dmitr@mail.ru. Scopus Author ID 37124831400, ResearcherID K-1632-2014, SPIN-код РИНЦ 6099-9599, <https://orcid.org/0000-0002-9567-8927>

About the authors

Nikolay V. Zenchenko, Researcher, V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences (7/5, Nagorny pr., Moscow, 117105 Russia); Researcher, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences (38, Vavilova ul., Moscow, 119991 Russia); Senior Lecturer, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: zenchenko.nikolay@yandex.ru. Scopus Author ID 56891470400, ResearcherID K-2233-2015, RSCI SPIN-code 7667-6535, <https://orcid.org/0000-0002-7932-1821>

Denis V. Lavrukhin, Researcher, V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences (7/5, Nagorny pr., Moscow, 117105 Russia); Researcher, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences (38, Vavilova ul., Moscow, 119991 Russia). E-mail: denis_lavruhin@mail.ru. Scopus Author ID 55794617500, ResearcherID K-2107-2014, RSCI SPIN-code 4006-0978, <https://orcid.org/0000-0002-8594-7855>

Igor A. Glinskiy, Researcher, V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences (7/5, Nagorny pr., Moscow, 117105 Russia); Researcher, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences (38, Vavilova ul., Moscow, 119991 Russia); Senior Lecturer, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: glinskiy.igor@yandex.ru. Scopus Author ID 57190616854, ResearcherID I-4334-2015, RSCI SPIN-code 6254-0273, <https://orcid.org/0000-0002-0477-608X>

Dmitry S. Ponomarev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Deputy Director, Leading Researcher, V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences (7/5, Nagorny pr., Moscow, 117105 Russia); Leading Researcher, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences (38, Vavilova ul., Moscow, 119991 Russia). E-mail: ponomarev_dmitr@mail.ru. Scopus Author ID 37124831400, ResearcherID K-1632-2014, RSCI SPIN-code 6099-9599, <https://orcid.org/0000-0002-9567-8927>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 615.471:616.12
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-58-71>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Методические особенности анализа фрактальной размерности сердечного ритма

М.О. Быкова[®],
В.А. Баландин

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цель. Целью работы было определение параметра фрактальной размерности, рассчитанного для последовательности длительностей R-R интервалов, выявление границы его изменения для здоровых и больных пациентов, а также возможности его использования в качестве дополнительного фактора при выявлении патологии сердечной деятельности.

Методы. Для определения параметра фрактальной размерности используются методики Херста, Барроу, минимальной площади покрытия и Хигучи. При оценке стационарности ряда кардиоинтервалов применяется стандартный метод сравнения средних арифметических и дисперсий по выборкам общего массива данных кардиоинтервалов. Для выявления различий фрактальных размерностей здоровых и больных пациентов выполнено ранжирование данного параметра. С помощью использования двухвыборочного критерия Колмогорова – Смирнова показано различие законов распределения в выборках для здоровых и больных пациентов.

Результаты. Показано, что из рассмотренных методов расчета фрактальной размерности наименьший разброс данных между здоровыми пациентами демонстрирует метод Хигучи. Выполнено ранжирование рассчитанных значений фрактальной размерности, позволившее выявить различие данного параметра для здоровых и больных пациентов. Показано, что различие в распределении фрактальной размерности здоровых и больных пациентов является статистически значимым для методов покрытия и Хигучи. В то же время при использовании традиционного метода Херста нет основания отвергать нулевую гипотезу о принадлежности двух групп пациентов одной генеральной совокупности.

Выводы. На основании полученных данных было показано, что статистически значимое различие между показателями фрактальной размерности длительностей R-R интервалов здоровых и больных пациентов имеет место при применении метода Хигучи. Установлено, что ранжирование выборок позволяет эффективно различать фрактальные размерности здоровых и больных пациентов. Результаты работы показывают перспективность дальнейших исследований, направленных на использование фрактальных характеристик кардиоритма для выявления нарушений последнего, что может служить дополнительным фактором при определении патологии деятельности сердца.

Ключевые слова: фрактал, фрактальная размерность, ишемическая болезнь сердца, хроническая сердечная недостаточность, метод Хигучи, метод минимальной площади покрытия, метод Херста

• Поступила: 30.05.2022 • Доработана: 14.09.2022 • Принята к опубликованию: 25.01.2023

Для цитирования: Быкова М.О., Баландин В.А. Методические особенности анализа фрактальной размерности сердечного ритма. *Russ. Technol. J.* 2023;11(2):58–71. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-58-71>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Methodological features of the analysis of the fractal dimension of the heart rate

Margarita O. Bykova[@],
Vyacheslav A. Balandin

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. The aim of the present work is to determine the fractal dimension parameter calculated for a sequence of R–R intervals in order to identify the boundaries of its change for healthy and sick patients, as well as the possibility of its use as an additional factor in the detection of cardiac pathology.

Methods. In order to determine the fractal dimension parameter, the Hurst-, Barrow-, minimum coverage area-, and Higuchi methods are used. For assessing the stationarity of a number of electrocardiography (ECG) intervals, a standard method is used to compare arithmetic averages and variances from samples of the total data array of ECG intervals. To identify differences in fractal dimensions of healthy and sick patients, this parameter was ranked. Using the Kolmogorov–Smirnov two-sample criterion, the difference between the distribution laws in the samples for healthy and sick patients is shown.

Results. Among the considered methods for calculating the fractal dimension, the Higuchi method demonstrates the smallest data spread between healthy patients. By ranking the calculated fractional dimension values, it was possible to identify the difference between this parameter for healthy and sick patients. The difference in the distribution of fractal dimension of healthy and sick patients is shown to be statistically significant for the coverage and Higuchi methods. At the same time, when using the traditional Hurst method, there is no reason to reject the null hypothesis that two groups of patients belong to the same general population.

Conclusions. Based on the obtained data, the difference between the fractal dimension indicators of the duration of R–R intervals of healthy and sick patients is shown to be statistically significant when using the Higuchi method. The fractal dimensions of healthy and sick patients can be effectively distinguished by ranking samples. The results of the research substantiate prospects for further studies aimed at using fractal characteristics of the heart rhythm to identify abnormalities of the latter, which can serve as an additional factor in determining heart pathologies.

Keywords: fractal, fractal dimension, coronary heart disease, chronic heart failure, Higuchi method, minimum coverage area method, Hurst method

• Submitted: 30.05.2022 • Revised: 14.09.2022 • Accepted: 25.01.2023

For citation: Bykova M.O., Balandin V.A. Methodological features of the analysis of the fractal dimension of the heart rate. *Russ. Technol. J.* 2023;11(2):58–71. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-58-71>

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

Вариабельность сердечного ритма (ВСР) стала одним из эффективных методов оценки нервной регуляции работы сердца, позволяющим анализировать взаимодействие между симпатическими и блуждающими флуктуациями, а также их влияние на частоту сердечных сокращений. Колебания частоты сердцебиения демонстрируют различные линейные, нелинейные, периодические и аperiodические колебательные паттерны.

На протяжении нескольких десятков лет интенсивное изучение вариабельности сердечного ритма позволило провести корреляцию между его изменениями и наличием патологий работы сердечно-сосудистой системы. В России фундаментальные исследования данного направления, выполненные в научной школе Р.М. Баевского¹, а также другими учеными [1–4], позволили дать физиологическую интерпретацию вариабельности сердечного ритма при анализе информации о состоянии и функционировании систем, регулирующих ритм сердца.

Проведенные исследования позволили прийти к выводу, что оценка общей вариабельности сердечного ритма помогает осуществлять раннюю диагностику нарушений работы сердечно-сосудистой системы. Существует целый ряд различных подходов к анализу процесса сердцебиения. В частности, успешно

используется анализ вариабельности на основе изучения статистических параметров ритмограмм. Также широкое распространение получил спектральный анализ ритмограмм, основанный на быстром преобразовании Фурье и последующем анализе распределения спектральной плотности по частотному диапазону. В результате выполненных исследований было установлено, например, что высокочастотная область (0.15–0.4 Гц) является маркером блуждающей модуляции, а низкочастотная область (0.04–0.15 Гц) преимущественно отражает симпатический тонус и барорефлексную активность. Частотная и временная методики, а также ряд других методик основаны на предположении, что сигналы ВСР линейны, а, следовательно, не могут отражать и количественно оценивать динамическую структуру сигнала. Для оценки нелинейных свойств был также предложен ряд методов, включая фрактальную размерность, показатели Ляпунова, корреляционную размерность, приближенную энтропию и анализ флуктуаций с понижением тренда [5–9]. Все эти методы определяют свойства ВСР как нелинейного процесса, реагирующего на внешние возмущения нелинейным образом. Последние 2–3 десятилетия предприняты попытки описания таких нелинейных систем с позиции детерминированного хаоса [10–12], который, в отличие от обиходного понимания беспорядка как абсолютно случайного процесса, относится к процессам ограниченной случайности. Именно таким процессом является сердечный ритм. Как отмечается в [13], для нормального функционирования организма необходима некоторая норма хаотичности. Существенное отклонение от нормы как в сторону большего порядка, так и в сторону большей хаотичности может указывать на заболевание организма.

В настоящей работе рассмотрена одна из методик нелинейного исследования ритма сердца – анализ фрактальной размерности – коэффициента, описывающего фрактальные структуры или множества на основе количественной оценки их сложности². Данный параметр определяется для последовательности длительностей R-R интервалов здоровых пациентов

¹ Роман Маркович Баевский – д.м.н., профессор, Заслуженный деятель науки РФ, академик Международной академии астронавтики, академик Международной академии информатизации; один из основоположников авиакосмической кардиологии, космической телеметрии, концепции донозологической диагностики. Лично выполнял разработку системы медицинского контроля для космического полета Ю.А. Гагарина. В научной школе Р.М. Баевского можно выделить три основополагающих направления: баллистокardiографию и кардиографию; вариабельность сердечного ритма; космическую медицину и донозологическую диагностику. [Roman Markovich Baevsky, Dr. Sci. (Med.), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Academician at the International Academy of Astronautics, Academician at the International Academy of Informatization. He is one of the founders of aerospace cardiology, space telemetry, and the concept of prenosological diagnostics, having personally carried out the development of a medical control system for Yu.A. Gagarin. In Baevsky's scientific school, three fundamental directions can be distinguished: ballistocardiography and cardiography; heart rate variability; space medicine and prenosological diagnostics.]

² Фрактальная размерность. https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Фрактальная_размерность&stable=1. Дата обращения 23.04.2022. [Fractal dimension. https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Фрактальная_размерность&stable=1. Accessed April 23, 2022 (in Russ.).]

и больных хронической сердечной недостаточностью (ХСН) и ишемической болезнью сердца (ИБС).

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ D

Б. Мандельброт [14] дает следующее определение фракталам: «Фракталом называется структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому». Основной характеристикой самоподобных структур, определяющей степень изрезанности пространства, является фрактальная размерность D . Есть ряд различных способов ее определения. Один из самых популярных – это метод Херста [15, 16], основанный на отношении размаха накопленного отклонения к стандартному отклонению. Иное название данной методики – R/S -анализ.

Его суть выражается следующей формулой:

$$\frac{R}{S} = (aN)^H,$$

где a – некоторая постоянная для конкретного процесса; N – объем данных; H – показатель Херста; S – среднее квадратичное отклонение ряда; R – размах накопленного отклонения, т.е. разность между максимальными и минимальными значениями накопленного отклонения от среднего арифметического ряда Z на участке $[1; u]$. В свою очередь u принадлежит участку от 1 до N . На рис. 1 показаны изменения некоторой величины X , ее накопленного отклонения Z и среднее значение $X_{\text{ср}u}$ на участке $[1; u]$:

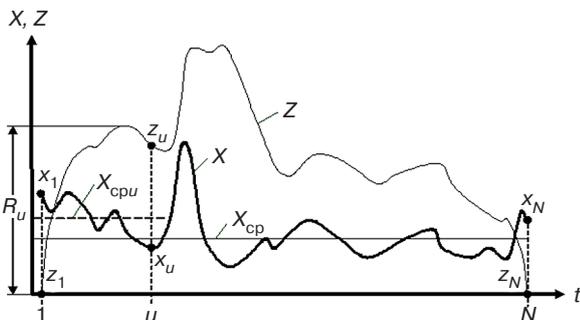


Рис. 1. Изменения величины X (жирная линия), ее накопленное отклонение Z (тонкая линия) и среднее значение $X_{\text{ср}}$ (R_u – размах накопленного отклонения; $X_{\text{ср}u}$ – среднее значение X на участке; x_1 – начальное значение величины X ; z_1 – начальное значение накопленного отклонения Z ; z_u – значение накопленного отклонения Z , взятое в точке u ; x_u – значение величины X , взятое в точке u ; x_N – конечное значение величины X ; z_N – конечное значение накопленного отклонения Z)³

³ Кобенко В.Ю. *Фракталы в науке и технике. Методические указания по выполнению лабораторных работ в приложении Microsoft Excel.* Омск: ОмГТУ; 2005. С. 6. [Kobenko V.Yu. *Fractals in science and technology. Guidelines for performing laboratory work in the Microsoft Excel application.* Omsk: OmGTU; 2005. P. 6 (in Russ.).]

Фрактальная размерность связана с показателем Херста соотношением:

$$D = 2 - H.$$

Еще одним способом определения фрактальной размерности является метод Барроу⁴. Он заключается в нахождении средней дисперсии приращений W , которая вычисляется по следующей формуле:

$$W(\Delta N) = \frac{1}{N - \Delta N} \sum_{i=1}^{N-\Delta N} (x_{i+\Delta N} - x_i)^2,$$

где $1 \leq \Delta N \leq N - 1$.

Зависимость $W = f(\Delta N)$ описывается теоретической моделью:

$$W = (a\Delta N)^B,$$

где a – некоторая постоянная для данного ряда данных, B – показатель Барроу.

Фрактальная размерность определяется как:

$$D = 2 - B.$$

Также распространение получил метод минимальной площади покрытия. Он применяется, в частности, в экономической сфере, также используется для анализа метеорологических рядов [17]. В данном случае для определения фрактальной размерности объем данных N разбивается на δ частей, после чего вычисляется сумма амплитудных вариаций для каждой из полученных частей. Затем δ меняется, после нескольких повторений алгоритма строится график в логарифмическом масштабе зависимости V от δ . Полученный набор точек аппроксимируется прямой, после чего методом наименьших квадратов вычисляется угловой коэффициент k . На рис. 2 визуально представлен процесс вычисления площади покрытия при различных значениях δ .

Фрактальная размерность в данном случае находится по формуле:

$$D = k + 1.$$

В некоторых исследованиях, связанных с фрактальным анализом биологических процессов, для оценки фрактальной размерности применялся алгоритм Хигучи [15, 18]. В данной работе также будет использована эта методика.

Для получения фрактальной размерности D Хигучи исследовал конечный набор наблюдений, полученных с регулярным интервалом:

$$X(1), X(2), X(3), \dots, X(N).$$

⁴ Там же. С. 13–15. [Ibid. P. 13–15.]

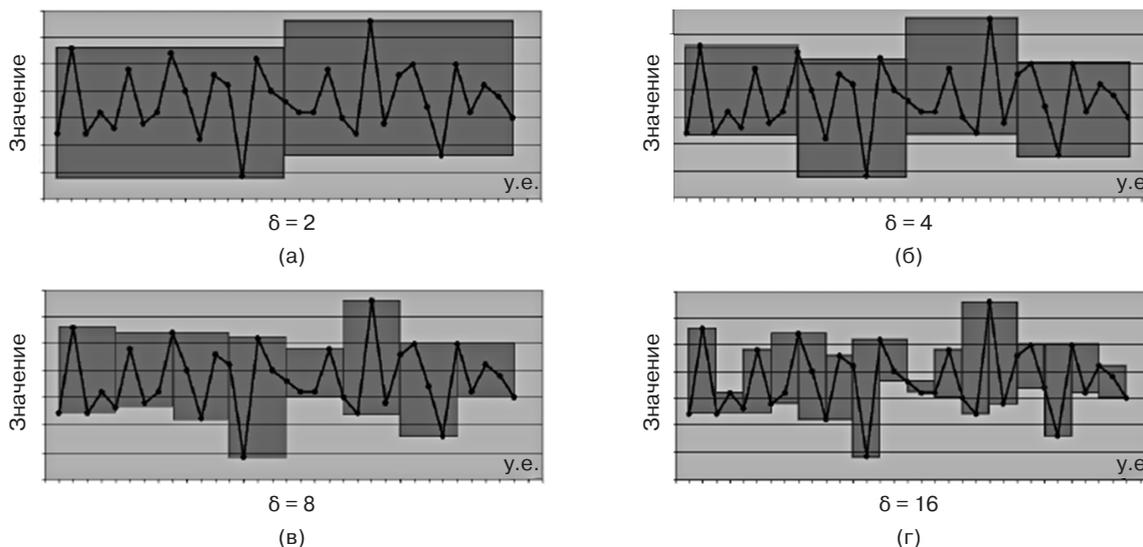


Рис. 2. Вычисление площади покрытия при различных значениях δ [17]

Из этих временных рядов образуется новый ряд X_k^m , который составляется следующим образом:

$$X_k^m : X(m), X(m+k), X(m+2k), \dots, X\left(m + \left[\frac{N-m}{k}\right]k\right),$$

где $m = 1, 2, \dots, k$; k и m – целые числа; m и k – порядковый номер отсчета и размер интервала, соответственно.

В рамках данного метода определяется длина кривой, связанной с каждым временным рядом X_k^m следующим образом:

$$L_m(k) = \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^{\left[\frac{N-m}{k}\right]} (X(m+ik) - X(m+(i-1)k)) \right) \left(\frac{N-1}{\left[\frac{N-m}{k}\right]k} \right),$$

где $\frac{N-1}{\left[\frac{N-m}{k}\right]k}$ – коэффициент нормализации. Для определения фрактальной размерности D берется среднее значение $\langle L(k) \rangle$ длин, связанных с временными рядами, при этом имеет место соотношение:

$$\langle L(k) \rangle \propto k^{-D}.$$

ФРАКТАЛЬНАЯ РАЗМЕРНОСТЬ ВАРИАбельНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ЗДОРОВЫХ И БОЛЬНЫХ ПАЦИЕНТОВ

Для расчета фрактальной размерности ВСП здоровых пациентов использовались записи длительностей R–R интервалов из базы данных «RR interval

time series from healthy subjects», для больных – из баз «Congestive Heart Failure RR Interval Database» и «St. Petersburg INCART 12-lead Arrhythmia Database». Базы представлены в открытом ресурсе медицинских сигналов Physionet⁵. Длительности R–R интервалов были получены с помощью инструмента Show RR intervals as text, предусмотренного этой базой, который автоматически определяет данный параметр на заданном временном промежутке. В начале исследования рассматривался временной промежуток из 450 значений R–R интервалов, что соответствовало примерно 5-минутной записи. Все дальнейшие вычисления проводились в программе Microsoft Excel. Алгоритмы определения фрактальной размерности методами Херста, Барроу и покрытия подробно описаны в работах [15–18]. Порядок построения фрактальной плоскости методом Хигучи состоял из следующих шагов:

1. Составление временных рядов, $k \in [2; 10]$.
2. Вычисление длины кривой $L_m(k)$ каждого ряда.
3. Определение среднего значения $\langle L(k) \rangle$ длин, связанных с временными рядами, для каждого набора наблюдений.
4. Построение графика зависимости $\langle L(k) \rangle$ от k в логарифмическом масштабе и определение методом наименьших квадратов значения фрактальной размерности D .

На рис. 3 показаны фрактальные плоскости, определенные четырьмя используемыми методами, для одного из здоровых пациентов.

Синим, красным, зеленым и фиолетовым цветами выделены координаты точек для фрактальных плоскостей R/S метода, метода Барроу, метода площади наименьшего покрытия и метода Хигучи, соответственно. Черным пунктиром обозначена аппроксимирующая

⁵ <https://physionet.org/>. Дата обращения 14.02.2022. / Accessed February 14, 2022.

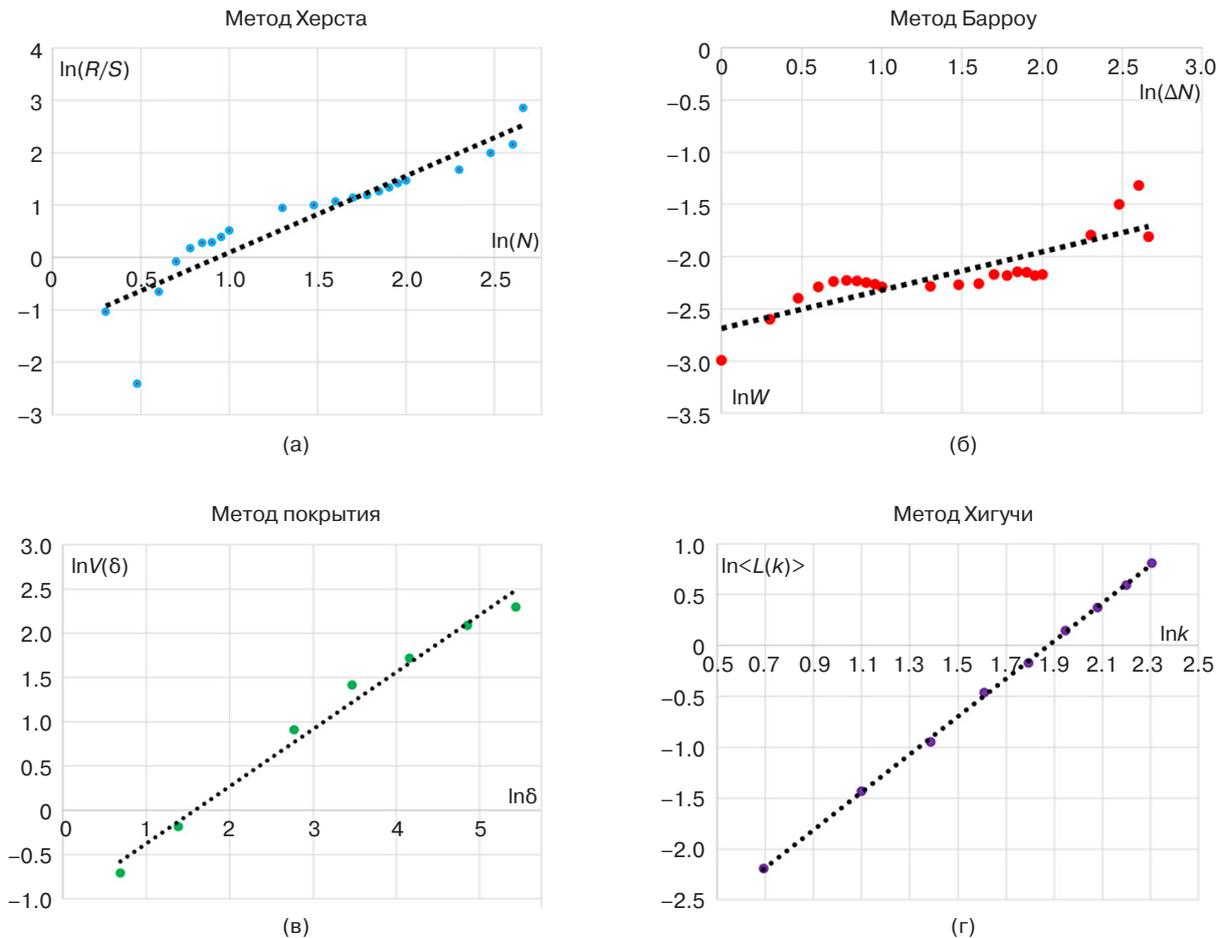


Рис. 3. Фрактальная плоскость здорового пациента:
(а) метод Херста, (б) метод Барроу, (в) метод площади наименьшего покрытия, (г) метод Хигучи

линия тренда, по угловому коэффициенту которой рассчитывается значение фрактальной размерности. Как следует из приведенных графиков, значения фрактальной размерности, определенные двумя последними методами, имеют существенно меньшую погрешность определения вследствие меньшего разброса данных, подлежащих аппроксимации. Описанными выше методами были найдены фрактальные размерности для десяти здоровых пациентов, а также пациентов с диагнозами «Хроническая сердечная недостаточность» (ХСН) и «Ишемическая болезнь сердца» (ИБС). Полученные значения представлены в табл. 1.

Отметим, что методика, предложенная Барроу, не слишком отличается от традиционного метода Херста, поскольку использует аналогичный подход, и поэтому в дальнейшем не будет рассматриваться. Фрактальная размерность D , полученная методом Хигучи, демонстрирует меньший разброс данных между здоровыми пациентами. В связи с этим более подробно будут рассмотрены результаты, полученные данной методикой.

Попадание большинства значений фрактальной размерности в интервал от 1.5 до 2 является показателем антиперсистентности ряда. Данное понятие свидетельствует о частой смене направления вектора развития

системы, более частой, чем это происходило бы при случайной последовательности. Приближение параметра фрактальной размерности к $D = 2$ говорит об усилении изменчивости ряда и характерно для ситуации, когда исследуемая последовательность имеет тенденцию к полному заполнению фрактальной плоскости. Значения, приближающиеся к 1.5, свидетельствуют о стремлении процесса к полной хаотичности – белому шуму. Попадание значений фрактальной размерности в интервал (1.5–2.0) указывает на эргодичность процесса – особое свойство определенных динамических систем, состоящее в том, что во время развития любое состояние, за редким исключением, с определенной вероятностью проходит вблизи каждого другого состояния системы⁶. При этом в определенных временных интервалах статистические характеристики совпадают. Чередование таких интервалов обусловлено наличием скрытой периодичности процесса, что является характерным, в частности, для сердечного ритма.

⁶ Эргодичность. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Эргодичность>. Дата обращения 17.04.2022. [Ergodicity. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Эргодичность>. Accessed April 17, 2022 (in Russ.).]

Таблица 1. Фрактальные размерности D десяти здоровых пациентов и больных ХСН и ИБС, вычисленные различными методами

№ пациента	Фрактальная размерность здоровых пациентов	Фрактальная размерность больных пациентов (ИБС)	Фрактальная размерность больных пациентов (ХСН)	Метод
1	1.896	1.499	1.754	Метод Херста
	1.791	1.502	1.753	Метод Барроу
	1.612	1.601	1.572	Метод покрытия
	1.638	1.695	1.685	Метод Хигучи
2	1.937	1.933	1.787	Метод Херста
	1.794	1.886	1.943	Метод Барроу
	1.722	1.595	1.606	Метод покрытия
	1.757	1.822	1.981	Метод Хигучи
3	1.944	1.815	1.432	Метод Херста
	1.845	1.767	1.871	Метод Барроу
	1.665	1.746	1.619	Метод покрытия
	1.702	1.910	1.805	Метод Хигучи
4	1.944	1.449	1.518	Метод Херста
	1.845	1.790	1.944	Метод Барроу
	1.665	1.494	1.627	Метод покрытия
	1.702	1.654	1.797	Метод Хигучи
5	1.529	1.783	1.770	Метод Херста
	1.463	1.275	1.994	Метод Барроу
	1.608	1.598	1.821	Метод покрытия
	1.630	1.665	1.982	Метод Хигучи
6	1.536	1.685	1.709	Метод Херста
	1.633	1.579	1.994	Метод Барроу
	1.646	1.528	1.683	Метод покрытия
	1.767	1.538	2.000	Метод Хигучи
7	1.459	1.979	1.964	Метод Херста
	1.615	1.722	1.863	Метод Барроу
	1.627	1.814	1.766	Метод покрытия
	1.751	2.000	1.928	Метод Хигучи
8	1.627	1.895	1.909	Метод Херста
	1.721	1.912	1.776	Метод Барроу
	1.663	1.738	1.703	Метод покрытия
	1.708	1.956	1.803	Метод Хигучи
9	1.665	1.739	1.735	Метод Херста
	1.988	1.747	1.699	Метод Барроу
	1.698	1.573	1.591	Метод покрытия
	1.772	1.608	1.560	Метод Хигучи
10	1.559	1.598	1.702	Метод Херста
	1.787	1.665	1.949	Метод Барроу
	1.605	1.648	1.600	Метод покрытия
	1.675	1.692	1.989	Метод Хигучи

Таблица 2. Сравнение фрактальных размерностей для здорового пациента, полученных методом Хигучи, для выборок объемом 200, 450, 900, 1000, 1200 и 1500 значений R-R интервала

Фрактальная размерность Хигучи при различном объеме входных данных						
Объем выборки	200	450	900	1000	1200	1500
Здоровый пациент	1.673	1.702	1.710	1.709	1.707	1.714

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ВЫБОРКИ

Размер выборки – важная особенность любого эмпирического исследования, цель которого – сделать выводы о параметрах генеральной совокупности на основе выборочных наблюдений. Шанс выявления статистически значимых различий зависит от размера выборки и величины истинного различия сравниваемых показателей [19].

В табл. 2 приведены значения фрактальной размерности Хигучи, полученные для здорового пациента, при увеличении объема выборки от 200 до 1500 кардиоинтервалов.

На основании приведенных в табл. 2 данных, фрактальные размерности D , рассчитанные методом Хигучи, определялись на объеме выборки равном 1000 значениям R–R интервала.

Следует отметить, что фрактальная размерность, рассчитанная методом покрытий, не обнаруживает зависимости от длительности записи как для больных, так и здоровых пациентов. В табл. 3 представлены значения D , вычисленные этим методом для выборок из 450 и 1000 значений.

Исходя из полученных данных следует, что фрактальная размерность D , рассчитанная методом

Таблица 3. Сравнение фрактальных размерностей 3 пациентов, полученных методом покрытия, для выборок из 450 и 1000 значений R–R интервалов

Фрактальная размерность методом покрытия при значении интервала		Пациент
450	1000	
1.72	1.75	Здоровый
1.74	1.72	ИБС
1.57	1.59	ХСН

Таблица 4. Значения средних арифметических и дисперсий по выборкам из 100 интервалов, взятым из массива объемом 1000 кардиоинтервалов

Параметр	1–100	100–200	200–300	300–400	400–500	500–600	600–700	700–800	800–900	900–1000	Пациент
Ср. знач., с	0.754	0.785	0.779	0.754	0.725	0.639	0.610	0.638	0.660	0.734	ХСН
Дисперсия, $c^2 \cdot 10^3$	1.568	3.241	9.201	3.334	1.221	2.159	3.101	7.528	1.116	5.211	
Ср. знач., с	0.799	0.807	0.801	0.755	0.722	0.750	0.742	0.748	0.783	0.753	Здоровый
Дисперсия, $c^2 \cdot 10^3$	1.857	1.744	2.400	2.006	2.465	2.608	1.868	3.088	2.253	2.180	

покрытия, практически не зависит от объема выборки. Поэтому для данного метода объем выборки в рассматриваемом интервале значений не критичен. Учитывая полученные в табл. 2 результаты, в дальнейшем будем использовать выборку с входным объемом данных 1000 значений R–R интервалов.

ОЦЕНКА СТАЦИОНАРНОСТИ

Фракталы тесно связаны с понятием динамического хаоса, иногда используется также понятие детерминированного хаоса. Одним из условий существования такого хаоса является нелинейность. Подробно эти понятия описаны в работе [20]. В данном разделе рассмотрены вопросы стационарности выборки из 1000 R–R интервалов.

Как известно, стационарность – это неизменяемость характеристик случайного процесса со временем: среднее значение и дисперсия стационарного процесса остаются постоянными вне зависимости от времени, а автокорреляционная функция зависит только от разности между моментами времени, в которых она определяется. В табл. 4 представлены значения средних арифметических, определенных для последовательных выборок, состоящих из 100 длительностей кардиоинтервалов. Как видно из приведенных данных, средние значения изменяются на 11–25%, при этом величина дисперсии также не остается постоянной, изменяясь от ~50% для здоровых пациентов до 300% для больных ХСН. Таким образом ряд значений длительностей R–R интервалов не является стационарным ни при наличии патологий, ни при их отсутствии.

Данный факт является дополнительным подтверждением целесообразности использования представлений о детерминированном хаосе для описания массива длительностей кардиоинтервалов.

Используя все ранее указанные алгоритмы и выводы, авторы составили таблицу, содержащую фрактальные размерности D для данных объемом 1000 R-R интервалов. Фрактальные размерности были рассчитаны с использованием методов Херста, минимальной площади покрытия, Хигучи.

Стоит отметить, что используемая база данных пациентов с ХСН содержит информацию о кардиоинтервалах более чем 20 пациентов. Поэтому объем выборки для данной патологии был увеличен до 20 пациентов. Полученные результаты представлены в табл. 5.

Можно заметить, что средние значения фрактальной размерности для всех трех методов не позволяют надежно идентифицировать наличие патологии. Отметим, что средние значения фрактальной размерности D здоровых пациентов, определенные методами покрытия и Хигучи, соответствуют

данным работы [21], тогда как результаты по методу Херста дают завышенные значения. Табличное представление данных является достаточно трудным для восприятия и анализа, поэтому в настоящей работе данные табл. 5 подвергались дополнительной обработке.

РАНЖИРОВАНИЕ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Был использован метод ранжирования, заключающийся в расположении предметов или явлений в порядке убывания или возрастания определенного, присущего каждому из них признака. В данном случае ранжирование выполнено в порядке возрастания фрактальной размерности D . При этом необходимо определить количество рангов и диапазон значений D , которому каждый ранг будет соответствовать.

Таблица 5. Фрактальные размерности, рассчитанные тремя разными методиками, для объема входных данных, равного 1000 кардиоинтервалам

№ пациента	Фрактальная размерность по методу Хигучи			Фрактальная размерность по методу покрытия			Фрактальная размерность по методу Херста		
	ХСН	Здоровый	ИБС	ХСН	Здоровый	ИБС	ХСН	Здоровый	ИБС
1	1.621	1.720	1.755	1.587	1.650	1.645	1.728	1.863	1.629
2	1.966	1.783	1.674	1.650	1.746	1.576	2.000	1.979	1.902
3	1.834	1.709	1.897	1.651	1.717	1.719	1.679	1.948	2.000
4	1.832	1.717	1.650	1.665	1.717	1.577	1.519	1.948	1.722
5	1.983	1.703	1.659	1.816	1.648	1.598	2.000	1.718	1.713
6	2.028	1.714	1.573	1.693	1.646	1.547	2.000	1.824	1.674
7	1.848	1.752	2.008	1.704	1.676	1.873	1.946	1.704	2.000
8	1.756	1.746	1.903	1.733	1.711	1.720	2.000	1.707	1.816
9	1.488	1.758	1.659	1.641	1.676	1.588	1.884	1.704	1.709
10	1.965	1.679	1.747	1.637	1.630	1.709	1.865	1.691	1.705
11	1.811	–	–	1.710	–	–	1.939	–	–
12	1.783	–	–	1.619	–	–	1.430	–	–
13	1.949	–	–	1.677	–	–	1.786	–	–
14	1.818	–	–	1.668	–	–	1.969	–	–
15	1.879	–	–	1.542	–	–	2.000	–	–
16	1.739	–	–	1.687	–	–	1.669	–	–
17	1.579	–	–	1.632	–	–	1.703	–	–
18	1.739	–	–	1.414	–	–	1.883	–	–
19	1.510	–	–	1.552	–	–	1.507	–	–
20	1.513	–	–	1.616	–	–	1.801	–	–
Среднее значение ± доверительный интервал	1.782 ±0.077	1.728 ±0.022	1.752 ±0.100	1.645 ±0.039	1.682 ±0.028	1.655 ±0.072	1.866 ±0.121	1.808 ±0.084	1.827 ±0.151

В настоящей работе использовано 10 рангов. Несмотря на то, что фрактальная размерность определяется на участке значений от 1 до 2, подавляющее большинство значений D сконцентрировано в интервале от 1.5 до 2. Эта область и разбивается на 10 рангов через 0.05 с границами каждого ранга ± 0.025 .

После анализа данных, представленных в табл. 5, было отмечено, что большинство значений фрактальных размерностей D здоровых пациентов попало в диапазон значений от 1.675 до 1.825, соответствующих рангам 4 и 5. В табл. 6 представлено распределение по рангам фрактальной размерности здоровых и больных пациентов.

Как видно из таблицы, значения размерности для здоровых пациентов, рассчитанные по методу Хигучи, в 9 случаях из 10 имеют ранг 4–5. Для больных ХСН только 3 человека из 20 имеют такой ранг (15%), для больных ИБС эта величина составляет 30% (3 человека из 10). Для размерностей,

определенных методами покрытия и Херста, картина распределения рангов между здоровыми и больными пациентами размывается.

Для оценки статистической значимости разделения по рангам здоровых и больных пациентов был использован критерий Колмогорова – Смирнова для проверки однородности распределения двух выборок [22]. В основе данного критерия лежит сопоставление эмпирических функций распределения, которые определены для двух выборок. В табл. 7 представлены рассчитанные значения критерия, которые сравниваются с табличными значениями при уровне значимости 0.01.

В первой строке представлено табличное значение критерия Колмогорова – Смирнова для 10 здоровых и 20 пациентов с ХСН, во второй строке – для 10 здоровых пациентов и 10 с ИБС.

Данные табл. 7 свидетельствуют о том, что различие в распределении фрактальной размерности

Таблица 6. Ранжирование результатов табл. 5

№ пациента	Ранжирование результатов для метода Хигучи			Ранжирование результатов для метода покрытия			Ранжирование результатов для метода Херста		
	ХСН	Здоровый	ИБС	ХСН	Здоровый	ИБС	ХСН	Здоровый	ИБС
1	2	4	5	2	4	3	4	7	2
2	9	6	4	3	5	2	10	10	8
3	7	4	8	3	4	4	4	9	10
4	7	4	3	3	4	2	0	8	4
5	10	4	3	6	3	2	10	4	4
6	10	4	2	4	3	1	10	6	3
7	7	5	10	4	4	7	9	4	10
8	5	5	8	5	4	4	10	4	6
9	0	5	3	3	4	2	8	4	4
10	9	4	5	3	3	4	6	4	4
11	6			4			9		
12	6			2			0		
13	9			4			6		
14	6			3			9		
15	7			1			10		
16	5			4			3		
17	2			3			4		
18	5			0			8		
19	0			1			0		
20	0			2			6		

Таблица 7. Сравнение рассчитанных и табличных значений двухвыборочного критерия D_{\max} Колмогорова – Смирнова для здоровых и больных пациентов

Табличное значение критерия D_{\max} (для 30 значений)	0.290
Табличное значение критерия D_{\max} (для 20 значений)	0.352
Рассчитанное значение D_{\max} ранжирования Хигучи (ХСН и здоровый)	0.500
Рассчитанное значение D_{\max} ранжирования Хигучи (ИБС и здоровый)	0.400
Рассчитанное значение D_{\max} ранжирования покрытия (ХСН и здоровый)	0.350
Рассчитанное значение D_{\max} ранжирования покрытия (ИБС и здоровый)	0.500
Рассчитанное значение D_{\max} ранжирования Херста (ХСН и здоровый)	0.200
Рассчитанное значение D_{\max} ранжирования Херста (ИБС и здоровый)	0.200

здоровых и больных пациентов статистически значимо ($D_{\max \text{ расч}} > D_{\max \text{ табл}}$) для метода Хигучи. В то же время при использовании методов Херста и покрытия нет основания отвергать нулевую гипотезу об отсутствии различий в распределении результатов для двух групп пациентов, т.е. две выборки могут принадлежать одной генеральной совокупности. Отметим также, что подтверждается ранее сделанный вывод о том, что фрактальная размерность, рассчитанная методом Хигучи, является, по-видимому, наиболее предпочтительной при выявлении патологии работы сердца.

На рис. 4 представлена схема процесса реализации метода разделения пациентов на группы по наличию и отсутствию патологии на основе значения фрактальной размерности кардиоритма.

**Рис. 4.** Алгоритм процесса разделения пациентов на группы по наличию и отсутствию патологии на основе значения фрактальной размерности кардиоритма

Далее подробно рассмотрены некоторые этапы, представленные на рис. 4. Входные данные R–R интервалов были получены на основе уже проанализированных записей Холтера здоровых и

больных пациентов, представленных в открытом ресурсе Physionet. Данные холтеровского мониторинга регистрировались в течение 24 ч с помощью цифровых трехканальных регистраторов DMS300–7 и DMS300–3А (DM Systems Co., Китай), а также регистраторов Galix (Galix Biomedical Instrumentation, США) с использованием электродов 3М. Регистраторы Galix имели программируемую частоту дискретизации считывания 512 и 1024 Гц и частоты дискретизации записи 128 Гц. Регистраторы DMS имели частоту дискретизации 1024 Гц на канал для анализа кардиограммы с усредненным сигналом, частоты дискретизации считывания 512 Гц и частоту дискретизации записи 128 Гц в других случаях. Сигналы анализировались с помощью программного обеспечения Galix и программного обеспечения CardioScan 10.0, 11.0⁷ для регистраторов DMS. Ошибка при определении R–R интервала составляла примерно 8 мс (в 2 раза больше ошибки при определении зубца R). Сердечные события в записях были автоматически обнаружены и классифицированы программным обеспечением Holter⁸, а затем проверены и скорректированы двумя кардиологами. Затем записи анализировались такт за тактом, чтобы выявить и исправить как можно больше R-зубцов. Таким образом, было уменьшено количество и продолжительность артефактов в сигнале.

Входные данные R–R интервалов затем необходимо обработать с помощью метода Хигучи, который был представлен выше.

Для определения ранга полученного значения D необходимо воспользоваться табл. 8, в которой представлены номера рангов, диапазоны входящих в них значений и средние значения каждого.

⁷ <https://vdd-pro.ru/ru/usb-kardiograf/programmnoe-obespechenie/>. Дата обращения 14.02.2022. / Accessed February 14, 2022 (in Russ.).

⁸ <https://dms-at.ru/products/programs/programmnoe-obespechenie-kholter/>. Дата обращения 14.02.2022. / Accessed February 14, 2022 (in Russ.).

Таблица 8. Порядковые номера рангов, их диапазоны и средние значения

№ ранга	Диапазон значений D	Среднее значение D
0	1.500–1.525	1.5125
1	1.525–1.575	1.55
2	1.575–1.625	1.6
3	1.625–1.675	1.65
4	1.675–1.725	1.7
5	1.725–1.775	1.75
6	1.775–1.825	1.8
7	1.825–1.875	1.85
8	1.875–1.925	1.9
9	1.925–1.975	1.95
10	1.975–2.000	1.9875

Если значение ранга попадает в интервал 4–6, то можно заключить, что входные данные R–R интервалов принадлежат здоровому пациенту, в противном случае можно полагать, что у пациента есть патология.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из математических приемов, позволяющих в той или иной степени оценить нестационарность процесса или его изрезанность (в геометрическом смысле), является метод исследования его фрактальности. Графическая запись электрокардиограммы, если рассматривать ее с точки зрения амплитудных изменений величины электрического потенциала во времени, также представляет собой

кривую, имеющую сильно изрезанную форму. Если рассматривать ритмограмму во времени, то можно прийти к выводу, что она в некотором роде имеет свойства фрактала.

В работе рассмотрены несколько методик нахождения фрактальной размерности последовательности длительностей кардиоинтервалов, а именно, методы Херста, Барроу, минимальной площади покрытия и Хигучи.

На основании полученных данных было показано, что при уровне значимости 0.01 различие между показателями фрактальной размерности длительностей R–R интервалов здоровых и больных пациентов является статистически значимым при применении метода Хигучи. Установлено, что ранжирование выборок позволяет эффективно различать фрактальные размерности здоровых и больных пациентов. Результаты работы показывают перспективность дальнейших исследований, направленных на использование фрактальных характеристик кардиоритма для выявления нарушений последнего, что может служить дополнительным фактором при определении патологии деятельности сердца.

Вклад авторов

М.О. Быкова – сбор и анализ информации для статьи, расчеты и анализ фрактальной размерности, полученной различными методами.

В.А. Баландин – концептуальная идея, обсуждение и анализ полученных результатов.

Authors' contributions

M.O. Bykova – collection and analysis of information for the article, calculations and analysis of fractal dimension obtained by various methods.

V.A. Balandin – conceptual idea, discussion and analysis of the obtained results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баевский Р.М. Кибернетический анализ процессов управления сердечным ритмом. В сб.: *Актуальные проблемы физиологии и патологии кровообращения*. М.: Медицина; 1976. С. 161–175.
2. Баевский Р.М., Берсенева А.П. *Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний*. М.: Медицина; 1997. С. 265.
3. Баевский Р.М. *Прогнозирование состояний на грани нормы и патологии*. М.: Медицина; 1979. 205 с.
4. Баевский Р.М., Иванов Г.Г. Вариабельность сердечного ритма: теоретические аспекты и возможности клинического применения. *Ультразвуковая и функциональная диагностика*. 2001;3:106–127.

REFERENCES

1. Baevskii P.M. Cybernetic analysis of heart rate control processes. In: *Aktual'nye problemy fiziologii i patologii krovoobrashcheniya (Actual Problems of Physiology and Pathology of Blood Circulation)*. Moscow: Meditsina; 1976. P. 161–175 (in Russ.).
2. Baevskii P.M., Berseneva A.P. *Otsenka adaptatsionnykh vozmozhnostei organizma i risk razvitiya zabolevanii (Assessment of the Adaptive Capabilities of the Body and the Risk of Developing Diseases)*. Moscow: Meditsina; 1997. P. 265. (in Russ.).
3. Baevskii P.M. *Prognozirovanie sostoyanii na grani normy i patologii (Prediction of Conditions on the Verge of Norm and Pathology)*. Moscow: Meditsina; 1979. 205 p. (in Russ.).

5. Антонов В.И., Загайнов А.И., Ву ван Куанг. Динамический фрактальный анализ variability сердечного ритма. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2012;1(140):88–94.
6. Федоров В.А., Мизирин А.В., Храмов П.И., Агафонова Н.А. Фрактальный анализ ритма сердца. *Вопросы современной педиатрии*. 2006;5(1):596.
7. Яцык В.З., Парамзин В.Б., Болотин А.Э., Воротова М.С. Фрактальный анализ variability сердечного ритма у биатлонисток с разным уровнем тренированности. *Физическая культура, спорт – наука и практика*. 2018;4:95–102.
8. Sen J., McGill D. Fractal analysis of heart rate variability as a predictor of mortality: A systematic review and meta-analysis. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 2018;28(7):072101. <https://doi.org/10.1063/1.5038818>
9. Рахимов Н.Г., Олимзода Н.Х., Мурадов А.М., Мурадов А.А., Хусайнова М.Б. Некоторые показатели фрактального анализа variability сердечного ритма, как предикторы тяжелой преэклампсии и эклампсии. *Вестник последипломного образования в сфере здравоохранения*. 2018;1:70–75.
10. Голдбергер Э.Л., Ригни Д.Р., Уэст Б.Дж. Хаос и фракталы в физиологии человека. *В мире науки*. 1990;4:25–32.
11. Шустер Г. *Детерминированный хаос: Введение*. М.: Мир; 1988. 248 с.
12. Лоренц Э. Детерминированное непериодическое движение. *Странные аттракторы: сборник статей*. М.: Физматлит; 1981. С. 88–116.
13. Климонтович Ю.Л. *Турбулентное движение и структура хаоса: Новый подход к статистической теории открытых систем*. М.: URSS; 2021. 326 с. ISBN 978-5-9710-8442-6
14. Мандельброт Б. *Фрактальная геометрия природы*. М.: Институт компьютерных исследований; 2002. 656 с.
15. Cervantes-De la Torre F., González-Trejo J.I., Real-Ramírez C.A., Hoyos-Reyes L.F. Fractal dimension algorithms and their application to time series associated with natural phenomena. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013;475(1):012002. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/475/1/012002>
16. Антипов О.И., Нагорная М.Ю. Показатель Херста биоэнергетических сигналов. *Инфокоммуникационные технологии*. 2011;9(1):75–77.
17. Аптуков В.Н., Митин В.Ю. Фрактальный анализ метеорологических рядов с помощью метода минимального покрытия. *Географический вестник*. 2019;2(49):67–79. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2019-2-67-79>
18. Гладун К.В. Фрактальная размерность Хигучи как метод оценки реакции на звуковые стимулы у пациентов с диффузным аксональным повреждением головного мозга. *Современные технологии в медицине*. 2020;12(4):63–71. <https://doi.org/10.17691/stm2020.12.4.08>
4. Baevskii P.M., Ivanov G.G. Cardiac rhythm variability: the theoretical aspects and the opportunities of clinical application (lecture). *Ul'trazvukovaya i funktsional'naya diagnostika = Ultrasound and Functional Diagnostics*. 2001;3:106–127 (in Russ.).
5. Antonov V.I., Zagainov A.I., Vu van Quang. Dynamic fractal analysis of heart rate variability. *Nauchno-tekhnicheskie ведомости Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie = St. Petersburg Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*. 2012;1(140):88–94 (in Russ.).
6. Fedorov V.A., Mizirin A.V., Khramtsov P.I., Agafonova N.A. Fractal analysis of heart rhythm. *Voprosy sovremennoy pediatrii = Current Pediatrics*. 2006;5(1):596 (in Russ.).
7. Yatsyk V.Z., Paramzin V.B., Bolotin A.E., Vorotova M.S. Fractal analysis of variability of heart rhythm among female biathletes with a different training level. *Fizicheskaya kul'tura, sport – nauka i praktika = Physical Education, Sports – Science and Practice*. 2018;4:95–102 (in Russ.).
8. Sen J., McGill D. Fractal analysis of heart rate variability as a predictor of mortality: A systematic review and meta-analysis. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 2018;28(7):072101. <https://doi.org/10.1063/1.5038818>
9. Rakhimov N.G., Olimzoda N.Kh., Muradov A.M., Muradov A.A., Khusainova M.B. Some indicators of fractal analysis heart rate variability as predictors of the development of severe preeclampsia and eclampsia. *Vestnik poslediplomnogo obrazovaniya v sfere zdravookhraneniya = Herald of Postgraduate Education Health Sphere*. 2018;1:70–75 (in Russ.).
10. Goldberger E. L. Goldberger A.L., Rigney D.R., West B.J. Chaos and fractals in human physiology. *V mire nauki (Russian version) = Sci. American*. 1990;4:25–32 (in Russ.).
11. Shuster G. *Determinirovannyi khaos: Vvedenie (Deterministic chaos: An Introduction)*. Moscow: Mir; 1988. 248 p. (in Russ.).
12. Lorenz E. Deterministic non-periodic motion. In: *Strange attractors: collection of articles*. Moscow: Fizmatlit; 1981. P. 88–116 (in Russ.).
13. Klimontovich Yu.L. *Turbulentnoe dvizhenie i struktura khaosa: Novyi podkhod k statisticheskoi teorii otkrytykh sistem (Turbulent motion and the structure of chaos: A new approach to the statistical theory of open systems)*. Moscow: URSS; 2021. 326 p (in Russ.).
14. Mandelbrot B. *Fractal geometry of nature*. Moscow: Institut komp'yuternykh issledovaniy; 2002. 656 p. (in Russ.).
15. Cervantes-De la Torre F., González-Trejo J.I., Real-Ramírez C.A., Hoyos-Reyes L.F. Fractal dimension algorithms and their application to time series associated with natural phenomena. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013;475(1):012002. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/475/1/012002>
16. Antipov O.I., Nagornaya M.Yu. Bioenergetic signal Hearst index. *Infokommunikatsionnye tekhnologii = Infocommunication Technologies*. 2011;9(1):75–77 (in Russ.).

19. Койчубеков Б.К., Сорокина М.А., Мхитарян К.Э. Определение размера выборки при планировании научного исследования. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2014;4:71–74.
20. Анищенко В.С. Детерминированный хаос. *Соросовский образовательный журнал*. 1997;6:70–76.
21. Meganur R., Zaididul K., Maksudul H., Jarin S. Successive RR interval analysis of PVC with sinus rhythm using fractal dimension, Poincaré plot and sample entropy method. *Int. J. Image, Graphics and Signal Processing (IJIGSP)*. 2013;5(2):17–24. <https://doi.org/10.5815/ijigsp.2013.02.03>
22. Орлов А.И. Система моделей и методов проверки однородности двух независимых выборок. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2020;157:145–169. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-157-012>
17. Aptukov V.N., Mitin V.Yu. Fractal analysis of meteorological series based on the minimum covering method. *Geograficheskii vestnik = Geographical Bulletin*. 2019;2(49):67–79 (in Russ.). <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2019-2-67-79>
18. Gladun K.V. Higuchi fractal dimension as a method for assessing response to sound stimuli in patients with diffuse axonal brain injury. *Sovremennye tekhnologii v meditsine = Modern Technologies in Medicine*. 2020;12(4):63–71 (in Russ.). <https://doi.org/10.17691/stm2020.12.4.08>
19. Koichubekov B.K., Sorokina M.A., Mkhitarayan K.E. Sample size determination in planning of scientific research. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2014;4:71–74 (in Russ.).
20. Anishchenko V.S. Deterministic chaos. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal = Soros Educational Journal*. 1997;6:70–76 (in Russ.).
21. Meganur R., Zaididul K., Maksudul H., Jarin S. Successive RR interval analysis of PVC with sinus rhythm using fractal dimension, Poincaré plot and sample entropy method. *Int. J. Image, Graphics and Signal Processing (IJIGSP)*. 2013;5(2):17–24. <https://doi.org/10.5815/ijigsp.2013.02.03>
22. Orlov A.I. System of models and methods of testing the homogeneity of two independent samples. *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Polythematic online Electronic Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2020;157:145–169 (in Russ.). <https://doi.org/10.21515/1990-4665-157-012>

Об авторах

Быкова Маргарита Олеговна, магистрант кафедры биокibernетических систем и технологий Института искусственного интеллекта, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: margaritabyckova@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5398-3184>

Баландин Вячеслав Алексеевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры биокibernетических систем и технологий Института искусственного интеллекта, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: admiral49@mail.ru. Scopus Author ID 7003691025, SPIN-код РИНЦ 1288-9918

About the authors

Margarita O. Bykova, Student, Department of Biocybernetic Systems and Technologies, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: margaritabyckova@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5398-3184>

Vyacheslav A. Balandin, Cand. Sci. (Phys.–Math.), Assistant Professor, Department of Biocybernetic Systems and Technologies, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: admiral49@mail.ru. Scopus Author ID 7003691025, RSCI SPIN-code 1288-9918

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 519.857
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-72-83>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Оптимизация параметров сплайна при аппроксимации многозначных функций

Д.А. Карпов,
В.И. Струченков [®]

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

Резюме

Цели. Методы сплайн-аппроксимации последовательности точек на плоскости получают все более широкое применение в различных областях. Сплайн рассматривается как однозначная функция с известным числом повторяющихся элементов. Наиболее широкое применение получили полиномиальные сплайны. Применительно к проектированию трасс линейных сооружений приходится рассматривать задачу с неизвестным числом элементов. Алгоритм решения задачи применительно к проектированию продольного профиля реализован и опубликован ранее. В этой задаче элементами сплайна являются дуги окружностей, сопрягаемые отрезками прямых, и сплайн представляет собой однозначную функцию. Однако при проектировании плана трассы в общем случае сплайн является многозначной функцией. Поэтому разработанный ранее алгоритм не пригоден для решения этой задачи, даже в случае использования тех же элементов сплайна. Цель настоящей статьи – обобщение полученных результатов на случай аппроксимации многозначных функций с учетом особенностей проектирования трасс линейных сооружений. На первом этапе работы было определено число элементов аппроксимирующего сплайна с помощью динамического программирования. В статье рассматривается следующий этап решения задачи.

Методы. Для оптимизации параметров сплайна используется новая математическая модель в виде модифицированной функции Лагранжа и специальный алгоритм нелинейного программирования. При этом удается вычислять аналитически производные целевой функции по параметрам сплайна при отсутствии ее аналитического выражения через эти параметры.

Результаты. Разработаны математическая модель и алгоритм оптимизации параметров сплайна (как многозначной функции), состоящего из дуг окружностей, сопрягаемых отрезками прямых. Начальным приближением является сплайн, полученный на первом этапе.

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

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

• Поступила: 02.03.2022 • Доработана: 01.06.2022 • Принята к опубликованию: 26.01.2023

Для цитирования: Карпов Д.А., Струченков В.И. Оптимизация параметров сплайна при аппроксимации многозначных функций. *Russ. Technol. J.* 2023;11(2):72–83. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-72-83>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Optimization of spline parameters in approximation of multivalued functions

Dmitry A. Karpov,
Valery I. Struchenkov @

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
@ Corresponding author, e-mail: str1942@mail.ru

Abstract

Objectives. Methods for spline approximation of a sequence of points in a plane are increasingly used in various disciplines. A spline is defined as a single-valued function consisting of a known number of repeating elements, of which the most widely used are polynomials. When designing the routes of linear structures, it is necessary to consider a problem with an unknown number of elements. An algorithm implemented for solving this problem when designing a longitudinal profile was published earlier. Here, since the spline elements comprise circular arcs conjugated by line segments, the spline is a single-valued function. However, when designing a route plan, the spline is generally a multivalued function. Therefore, the previously developed algorithm is unsuitable for solving this problem, even if the same spline elements are used. The aim of this work is to generalize the obtained results to the case of approximation of multivalued functions while considering various features involved in designing the routes of linear structures. The first stage of this work consisted in determining the number of elements of the approximating spline using dynamic programming. In the present paper, the next stage of solving this problem is carried out.

Methods. The spline parameters were optimized using a new mathematical model in the form of a modified Lagrange function and a special nonlinear programming algorithm. 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.

Results. A mathematical model and algorithm were developed to optimize the parameters of a spline as a multivalued function consisting of circular arcs conjugated by line segments. The initial approximation is the spline obtained at the first stage.

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

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

• Submitted: 02.03.2022 • Revised: 01.06.2022 • Accepted: 26.01.2023

For citation: Karpov D.A., Struchenkov V.I. Optimization of spline parameters in approximation of multivalued functions. *Russ. Technol. J.* 2023;11(2):72–83. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-72-83>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Предложенный в [1] метод аппроксимации многозначных функций, заданных дискретно, сплайном специального вида предполагает двухэтапную схему решения задачи. Первый этап состоит в поиске числа элементов сплайна и приближенных значений его параметров с помощью динамического программирования. На втором этапе с использованием полученного на первом этапе сплайна как начального приближения, выполняется оптимизация его параметров с помощью нелинейного программирования. Первый этап рассматривался в [2]. В настоящей статье, которая является продолжением [2], рассматривается второй этап.

Сплайн состоит из повторяющейся связки «дуга окружности + отрезок прямой». На данном этапе известны начальная точка и направление касательной в ней, длины всех кривых и сопрягающих их прямых, что позволяет применить методы непрерывной оптимизации, в частности методы нелинейного программирования градиентного типа, несмотря на то что искомым сплайном является многозначной функцией.

Оптимизация параметров сплайна, полученного на первом этапе, необходима не только из-за недостаточной точности решения задачи на первом этапе, что обусловлено дискретностью поиска, но и из-за невозможности строгого выполнения на первом этапе ограничений по фиксированным точкам, т.е. исходным точкам, которые при аппроксимации не смещаются.

Возможно обычное для динамического программирования повторение расчетов с меньшими дискретами поиска для повышения точности. В данной задаче это особенно актуально, т.к. при известном числе элементов объем вычислений резко сокращается, что позволяет решать задачу с уменьшенными дискретами при увеличении их числа в приемлемое время на общедоступных компьютерах.

Задача рассматривается применительно к проектированию плана трасс линейных сооружений. Для некоторых из них, например, при проектировании траншеи для прокладки трубопроводов различного назначения сплайн рассматриваемого вида является окончательным. В проектировании трасс дорог прямые и окружности должны сопрягаться клотоидами для обеспечения непрерывности не только касательной, но и кривизны. Как показано в [2], при малых длинах клотоид их добавление в полученный сплайн

с окружностями приводит к незначительным смещениям. Однако для общего случая необходима реализация поэтапной схемы аппроксимации сплайном с повторяющимися связками «прямая + клотоида + окружность + клотоида». Решение этой задачи представляет собой предмет дальнейших исследований.

Необходимо отметить, что, как показано в [2], такой подход существенно отличается от принятого в практике проектирования метода подбора элементов в интерактивном режиме, и от различных полуавтоматических методов поиска границ кривых на основе графиков кривизны и угловых диаграмм, и от нового эвристического метода поиска границ кривых [3] с последующим применением генетических алгоритмов [4–12]. Использование адекватных математических моделей и математически корректных алгоритмов представляется более перспективным.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЕ ФОРМАЛИЗАЦИЯ

Задача состоит в том, чтобы найти сплайн заданного вида, который удовлетворяет всем ограничениям и наилучшим образом аппроксимирует заданную последовательность точек на плоскости [2, рис. 1].

Начальная точка A и направление касательной к искомому сплайну в этой точке заданы и не меняются в процессе поиска сплайна. Качество аппроксимации оценивается суммой квадратов отклонений h_j заданных точек от сплайна.

Требуется найти

$$\min F(\mathbf{h}) = \sum_1^n h_j^2. \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{h}(h_1, h_2, \dots, h_n)$ – вектор неизвестных, n – их количество. Вместо простой суммы может быть задана взвешенная сумма квадратов.

Отклонения h_j в практике проектирования в различных странах и в работах различных авторов вычисляются по-разному. Чаще отклонение точки от сплайна вычисляется по нормали к сплайну [2]. В России принято вычислять отклонение по нормали к исходной ломаной [2], т.е. по направлению к центру окружности, соединяющей три смежных точки. Если три точки лежат на одной прямой, то отклонение вычисляется по нормали к этой прямой.

Отмеченное различие в методах расчета не влияет на поиск числа элементов сплайна, поэтому на первом этапе был принят наиболее простой способ – по нормали к искомому сплайну. На втором этапе при оптимизации параметров сплайна будем использовать предварительно вычисленные нормали к исходной ломаной, т.е. фиксированные направления, которые не надо вычислять повторно в итерационном процессе. Это те самые нормали, на которых располагались точки, определяющие в динамическом программировании «состояния системы» [2, рис. 2].

Точка начала первой кривой может не совпадать с начальной точкой А, поэтому будем считать неизвестной длину начальной прямой L_1 и, в отличие от первого этапа, элементы сплайна будем рассматривать в следующем порядке: «прямая + окружность». Если число таких повторяющихся связей равно m , то система ограничений выглядит следующим образом:

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

$$L_j^k \geq L_{\min}^k, \quad (3)$$

$$R_{\min} \leq |R_j| \leq R_{\max}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (4)$$

Здесь, как и на первом этапе [2], L_j^{np} и L_j^k – длины прямой и кривой в j -й связке, а R_j – радиусы окружностей, знаки которых известны, что позволяет избавиться от взятия модуля в [4] и получить для каждого R_j линейное ограничение в виде двустороннего неравенства.

$$R_{\min} \leq R_j \leq R_{\max}, \quad \text{если } R_j > 0, \quad (5)$$

$$-R_{\max} \leq R_j \leq -R_{\min}, \quad \text{если } R_j < 0. \quad (6)$$

Конечная точка сплайна фиксирована, но его длина не ограничена. Если фиксировано и конечное направление, то задаются ограничения не только на h_n , но и на h_{n-1} . Кроме того, могут быть заданы ограничения на смещения отдельных точек как в форме неравенств, в т.ч. и двусторонних, вида

$$h_{\min} \leq h_m \leq h_{\max}, \quad (7)$$

так и равенств

$$h_m = h_0. \quad (8)$$

Это те самые фиксированные точки, наличие которых не удастся учесть в динамическом программировании.

В итоге получаем задачу нелинейного программирования с целевой функцией $F(\mathbf{h})$ и ограничениями (2), (3), (5)–(8), часть из которых может отсутствовать.

2. ОСОБЕННОСТИ ЗАДАЧИ

Ограничения (2), (3), (5), (6) не выражаются через неизвестные смещения h_j , но, зная все длины и радиусы, мы можем вычислить все h_j . Далее будем считать все длины и радиусы основными переменными, а все h_j – промежуточными, зависящими от основных. Аналитическое выражение этих зависимостей мы не знаем и выяснять его не будем. Нет и аналитического выражения целевой функции $F(\mathbf{h})$ через основные переменные. В итоге получаем задачу нелинейного программирования с простой системой ограничений (2), (3), (5), (6) относительно основных переменных, с несколькими ограничениями (7), (8) на промежуточные переменные и целевой функцией, выраженной через промежуточные переменные.

Алгоритмы нелинейного программирования при всем их многообразии¹ [13–26] сводятся к организации итерационного процесса со следующими пунктами:

- 1) построение допустимого начального приближения;
- 2) определение направления спуска из очередной итерационной точки, в частности из начальной;
- 3) проверка условий прекращения счета. Если они не выполнены, то переход к следующему пункту, иначе – окончание расчетов;
- 4) определение шага по найденному направлению из условия соблюдения ограничений и достижения точки минимума по направлению;
- 5) переход в новую точку и далее – к пункту 2.

В нашей задаче нужно многократно вычислять промежуточные переменные (смещения по нормлям) при изменении основных переменных. Для этого приходится искать точки пересечения двух прямых и прямой с окружностью (рис. 1).

Смещения исходных точек в проектное положение считаются положительными, если они осуществляются в направлении внешней нормали.

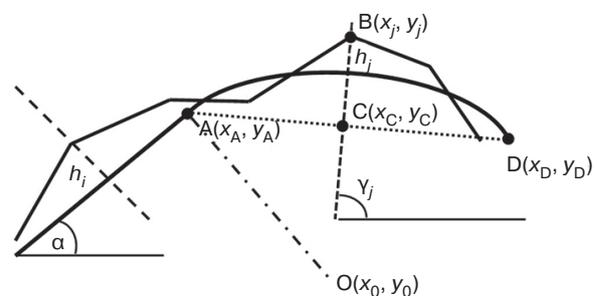


Рис. 1. Вычисление смещений по нормлям

¹ Пантелеев А.В., Лётова Т.А. *Методы оптимизации: учебное пособие*. М.: Логос; 2011. 424 с. ISBN 978-5-98704-540-4. [Panteleev A.V., Letova T.A. *Optimization methods: A handbook*. Moscow: Logos; 2011. 424 p. (in Russ.).]

Если обозначить координаты начала дуги окружности (точка А на рис. 1) через x_A и y_A , а угол касательной в этой точке с осью OX – через α , то координаты центра окружности $x_0 = x_A - R \sin \alpha$ и $y_0 = y_A + R \cos \alpha$. Здесь и далее радиус положительный при движении по кривой против часовой стрелки. Точка пересечения C с нормалью могла быть как вне, так и внутри дуги окружности. Но, не ограничивая общности, можно для точки пересечения нормали с окружностью записать $x_C = x_j + h_j \cos \gamma_j$ и $y_C = y_j + h_j \sin \gamma_j$. Здесь и далее γ_j – угол j -й нормали с осью OX .

Из условия принадлежности точки C окружности получаем относительно h_j квадратное уравнение, решение которого дает формулу для h_j :

$$h_j = \frac{(x_A - R \sin \alpha - x_j) \cos \gamma_j + (y_A + R \cos \alpha - y_j) \sin \gamma_j \pm \sqrt{\left(R^2 - [(x_A - R \sin \alpha - x_j) \sin \gamma_j - (y_A + R \cos \alpha - y_j) \cos \gamma_j]^2 \right)}}{2 \cos \gamma_j} \quad (9)$$

Для выбора на окружности точки, ближайшей к исходной, перед корнем берется знак «минус», если выражение перед корнем в (9) положительно, и наоборот. Отклонения h_j вычисляются последовательно от начальной точки к конечной. При этом для углов поворота дуг окружностей, больших чем π , имеют место особенности определения, попадает ли точка пересечения окружности и нормали (точка C на рис. 1) внутрь дуги или нет. Например, в общем случае нельзя считать, что если хорда $AC < AD$ (рис. 1), то точка C находится в пределах дуги AD (рис. 2).

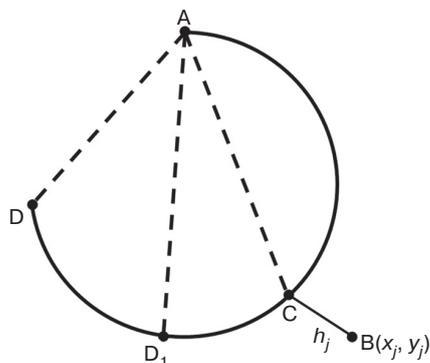


Рис. 2. Определение наличия пересечения нормали с дугой

В примере на рис. 2 $AC > AD$, но $AC < AD_1$, и правило определения положения точки на дуге путем сравнения длин хорд не работает.

Положение точки C относительно хорды AD (рис. 1) определяется знаком d .

$$d = (y_C - y_A)(x_D - x_A) - (x_C - x_A)(y_D - y_A).$$

Если $d > 0$, то точка C находится слева от направления AD , а при $d < 0$ – справа.

В этом легко убедиться, перейдя к системе координат с центром в точке A и направив ось OX по AD . Отсюда получаем правило: если $Rd > 0$, то точка C – вне дуги AD , иначе – внутри.

Еще одна особенность решаемой задачи состоит в том, что допустимая область не ограничена, т.к. неравенства (2), (3) односторонние. Однако это обстоятельство в данном случае несущественно, т.к. при поиске шага по направлению на каждой итерации можно ограничиться максимальным увеличением радиусов, длин прямых и дуг окружностей в 1 м.

Более важной усложняющей особенностью является уже отмечавшееся отсутствие аналитического выражения целевой функции через основные переменные. С другой стороны, существенным упрощением является крайне простой вид ограничений на основные переменные, что позволяет на каждой итерации при поиске направления спуска легко проверять целесообразность изменения набора активных ограничений по знаку соответствующих компонент градиента.

3. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПРОИЗВОДНЫХ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ ПО ОСНОВНЫМ ПЕРЕМЕННЫМ

Фактически речь идет о попытке аналитически вычислять градиент целевой функции по основным переменным, не имея ее аналитического выражения через эти переменные, с помощью пересчета производных. Оказалось, что в нашей задаче такой пересчет вполне возможен.

Будем считать, что набор основных переменных образует вектор x . Тогда формула пересчета производных имеет вид

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = \sum_1^n \frac{\partial F}{\partial h_j} \cdot \frac{\partial h_j}{\partial x_i}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (10)$$

где $\frac{\partial F}{\partial h_j} = 2h_j$ в силу (1).

Все сводится к вычислению производных смещений по нормальям через основные переменные. Покажем, как это делается в нашей задаче. Для этого, опуская индексы и сохраняя для радиуса произвольной дуги окружности обозначение R , длину произвольной прямой обозначим через l , а длину дуги окружности через L .

Начнем с длины прямой и дадим ей приращение δl , не меняя всех остальных длин и радиусов.

Очевидно, что искомое $\frac{\partial h_j}{\partial l} = 0$ для всех нормалей, расположенных ближе к началу сплайна, чем конец варьируемой прямой.

Если мы найдем δh_j – смещение точки пересечения j -й нормали со сплайном вдоль этой нормали,

вызванное изменением δl при неизменных значениях всех прочих переменных, то предельным переходом в $\delta h_j / \delta l$ при $\delta l \rightarrow 0$ получим нужную производную, не имея аналитического выражения для функции $h_j(l)$.

Увеличение длины прямой на δl при неизменных всех прочих переменных вызывает сдвиг всей последующей за ней части сплайна в направлении этой прямой на δl . Это простейшая вариация сплайна. Если точка пересечения сплайна и j -й нормали лежит на прямой (рис. 3), то

$$\frac{\partial h_j}{\partial l} = \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\gamma_j - \beta)}, \quad (11)$$

где β – угол этой прямой (элемент сплайна АВ на рис. 3) с осью OX , α – угол варьируемой прямой с осью OX (он задает направление сдвига) и γ_j – угол нормали (C_0C_1 на рис. 3) с осью OX . На рис. 3 точка C – исходное положение точки пересечения нормали и сплайна, ему соответствует значение промежуточной переменной h_j . При сдвиге в направлении, определяемом углом α на δl , АВ переходит в A_1B_1 , точка C – в C_2 , а точкой пересечения нормали со сплайном станет C_1 . Смещение h_j получает приращение $\delta h_j = CC_1$.

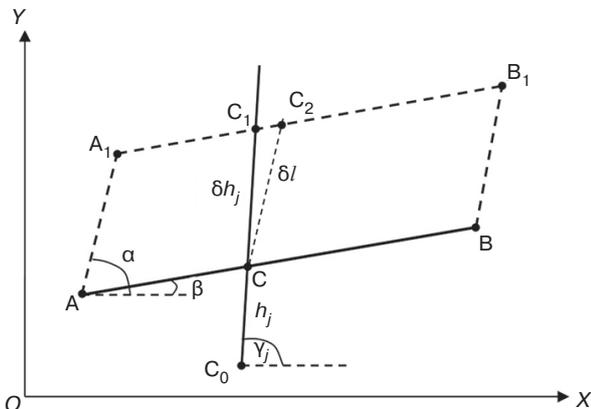


Рис. 3. Вычисление частных производных при изменении длины прямой

Формула (11) следует из теоремы синусов, если ее применить к треугольнику C_1CC_2 . В этой формуле $\sin(\gamma_j - \beta) \neq 0$, т.к. нормаль к исходной трассе в точке C и нормаль к сплайну, т.е. к прямой АВ, близки между собой, т.е. $\gamma_j - \beta \approx \pi/2$. При $\alpha = \beta$ направление сдвига совпадает с направлением прямой и поэтому $\delta h_j = 0$. Формула (11) верна и при $\alpha > \pi$.

Если точка пересечения сплайна и нормали лежит не на прямой, а на дуге окружности, то β – угол с осью OX касательной к дуге окружности в точке ее пересечения с нормалью, а формула (11) остается без изменений.

Рассмотрим влияние приращения длины дуги окружности на δL при неизменных значениях всех

остальных переменных. При этом участок сплайна от начала до L включительно не изменяется, а на оставшейся части происходит сдвиг на δL в направлении, составляющем с осью OX угол α , и поворот на угол $\delta\alpha$ всего следующего участка плана трассы. Здесь α – угол касательной в конце дуги окружности с осью OX , а $\delta\alpha$ – его приращение при изменении длины дуги на δL . Центр поворота находится в конце варьируемой дуги.

Влияние сдвига учитывается по формуле (11).

Рассмотрим теперь поворот участка плана трассы на угол $\delta\alpha$, вызванный удлинением δL . Поскольку $\delta\alpha = \delta L/R$, то достаточно вычислить $\frac{\partial h_j}{\partial \alpha}$.

Для вычисления $\frac{\partial h_j}{\partial \alpha}$ нужно по координатам конца дуги (центр поворота, точка А на рис. 4) и точки пересечения элемента сплайна (отрезка прямой или касательной к окружности) с нормалью (точка С, рис. 4) вычислить радиус поворота S .

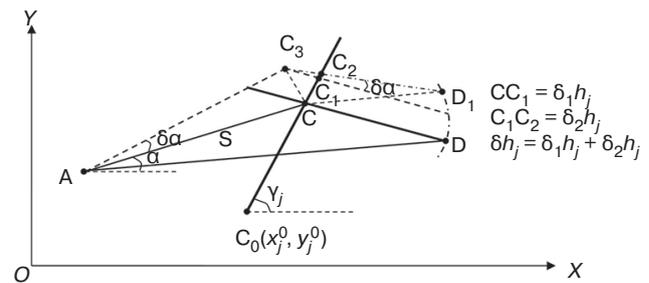


Рис. 4. Вычисление частных производных при повороте

Положение прямой CD после поворота можно найти двумя способами. Сначала поворот AC на угол $\delta\alpha$ – получим точку C_3 . Затем поворот AD на угол $\delta\alpha$ – получим точку D_1 . Пересечение прямой C_3D_1 с нормалью дает искомое $\delta h_j = CC_2$. Но мы не можем выразить CC_2 аналитически через известные углы и координаты.

Можно выполнить параллельный сдвиг CD по направлению CC_3 (получим точку C_1 на пересечении с нормалью), а затем поворот с центром в C_3 на угол $\delta\alpha$. Получим те же точки D_1 , а затем C_2 .

Приращение δh_j представим в виде суммы $\delta h_j = \delta_1 h_j + \delta_2 h_j$. Приращение $\delta_1 h_j = CC_1$ вызвано поворотом точки C вокруг точки A (она переходит в точку C_3) и параллельным смещением в направлении CC_3 . Поскольку мы хотим вычислить частные производные, то при малых углах поворота длины хорды, дуги и касательной являются величинами одного порядка, поэтому принимаем $CC_3 = S\delta\alpha$. Величины CC_3 , CC_1 и C_1C_3 имеют порядок $\delta\alpha$, а приращение $\delta_2 h_j = C_1C_2$ вызвано поворотом вокруг точки C_3 радиусом, имеющим первый порядок, на угол $\delta\alpha$.

и, следовательно, имеет более высокий порядок малости, чем $\delta_1 h_j$. Поэтому точка C_2 вообще не нужна.

Приращение $\delta_1 h_j$ вычисляем, как и ранее, в соответствии с (11), т.е. учитываем сдвиг на величину $S\delta\alpha$ в направлении по нормали к АС, которое составляет с осью OX угол $\alpha + \pi/2$.

По формуле (11):

$$\delta_1 h_j = \frac{S\delta\alpha \sin(\pi/2 + \alpha - \beta)}{\sin(\gamma_j - \beta)},$$

где β – угол смещаемой прямой CD с осью OX .

Отсюда
$$\frac{\delta_1 h_j}{\delta\alpha} = \frac{S \cos(\alpha - \beta)}{\sin(\gamma_j - \beta)}.$$

Обозначив координаты центра вращения через x_A, y_A и точки пересечения с нормалью – через x_C, y_C , получаем производную

$$\frac{\delta_1 h_j}{\delta\alpha} = \frac{(x_C - x_A) \cos \beta + (y_C - y_A) \sin \beta}{\sin(\gamma_j - \beta)}. \quad (12)$$

Как и ранее, β – угол с осью OX касательной к сплайну в точке пересечения с j -й нормалью, γ_j – угол этой нормали с осью OX .

Здесь выражение $S \cos(\alpha - \beta)$ заменено на $(x_C - x_A) \cos \beta + (y_C - y_A) \sin \beta$.

С учетом сдвига по касательной (11) и поворота (12), который сводится к сдвигу на $S\delta\alpha$, для искомой производной смещения h_j по длине дуги окружности L_i^k с учетом $\delta\alpha = \delta L_i^k / R_i$, где R_i – радиус варьируемой круговой кривой, получаем формулу:

$$\frac{\partial h_j}{\partial L_i^k} = \frac{\sin(\alpha - \beta) + \frac{(x_C - x_A) \cos \beta + (y_C - y_A) \sin \beta}{R_i}}{\sin(\gamma_j - \beta)}. \quad (13)$$

Формулы (11)–(13) можно применять, если нормаль пересекается не с прямой, а с дугой окружности. В этом случае β – угол с осью OX касательной к окружности в точке пересечения.

Переходим к вычислению частных производных промежуточных переменных по радиусам.

На рис. 5 АС – исходное положение дуги, АС₁ – положение этой дуги при изменении радиуса, но с сохранением начальной точки А(x_A, y_A), α – угла касательной с осью OX и длины L всей дуги АС. Вместо точки В на нормали получаем точку В₁. Смещение по нормали $\partial h_j = BB_1$, но новое положение точки В – это не В₁ (рис. 3 и 5), т.к. точка В уходит с нормали.

Зная координаты точек А(x_A, y_A) и В(x_B, y_B), углы касательной в этих точках с осью OX (α и β соответственно), L – длину дуги АВ и угол γ нормали с осью OX , вычислим производную смещения по

нормали $\partial h / \partial R$ (индексы нормали и кривой опускаем, т.к. точка В – произвольная точка произвольной дуги).

$$x_B - x_A = R(\sin \beta - \sin \alpha).$$

Здесь x_A не изменяется, а x_B и β зависят от R . Отсюда следует

$$\frac{\partial x_B}{\partial R} = \sin \beta - \sin \alpha + R \cos \beta \cdot \frac{\partial \beta}{\partial R}.$$

Далее $\beta - \alpha = \frac{L}{R}$. L и α фиксированы и $\frac{\partial \beta}{\partial R} = -\frac{L}{R^2}$.

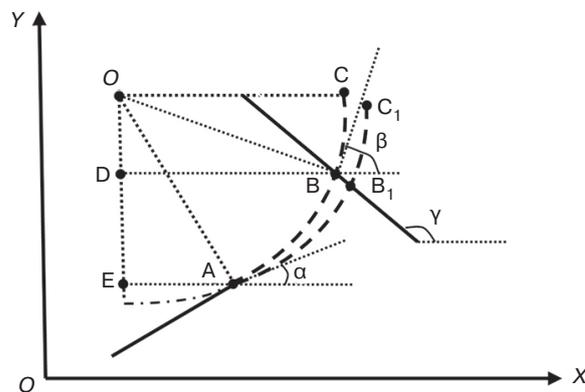


Рис. 5. Вычисление производных смещений внутри дуги при изменении радиуса

В итоге получаем

$$\frac{\partial x_B}{\partial R} = \sin \beta - \sin \alpha - (\beta - \alpha) \cos \beta. \quad (14)$$

Аналогично получим

$$\frac{\partial y_B}{\partial R} = \cos \alpha - \cos \beta - (\beta - \alpha) \sin \beta. \quad (15)$$

Приращение радиуса δR дает линейную часть приращения координат точки В

$$\delta x_B = \frac{\partial x_B}{\partial R} \delta R \quad \text{и} \quad \delta y_B = \frac{\partial y_B}{\partial R} \delta R. \quad (16)$$

Смещение по нормали δh_j получаем как результат сдвига касательной в точке В по оси OX на δx_B , а затем по оси OY – на δy_B . В первом случае направление сдвига в формуле (11) угол $\alpha = 0$, а во втором $\alpha = \pi/2$.

В итоге для точек внутри кривой получаем линейную часть смещения по нормали:

$$\delta h_j = \frac{\delta y_B \cos \beta - \delta x_B \sin \beta}{\sin(\gamma - \beta)}.$$

Используя (14)–(16), получаем производную

$$\frac{\delta h_j}{\delta R} = \frac{(\cos \alpha - \cos \beta - (\beta - \alpha) \sin \beta) \cos \beta}{\sin(\gamma - \beta)} - \frac{(\sin \beta - \sin \alpha - (\beta - \alpha) \cos \beta) \sin \beta}{\sin(\gamma - \beta)} = \frac{\cos(\beta - \alpha) - 1}{\sin(\gamma - \beta)}. \quad (17)$$

Применяя формулы (14), (15) к конечной точке кривой С, получим линейную часть приращений ее координат:

$$\delta x_C = \left(\sin \beta - \sin \alpha - \frac{L}{R} \cos \beta \right) \delta R,$$

$$\delta y_C = \left(\cos \alpha - \cos \beta - \frac{L}{R} \sin \beta \right) \delta R.$$

Здесь и далее α и β – углы касательных в начальной и конечной точках дуги с осью OX .

Такие же приращения получают и все последующие точки сплайна (сдвиг в том же направлении). Поэтому для линейной части смещения по нормали точки пересечения со сплайном получаем

$$\delta_1 h_j = \frac{\delta y_C \cos \beta_k - \delta x_C \sin \beta_k}{\sin(\gamma_j - \beta_k)} \delta R. \quad (18)$$

Здесь и далее β_k – угол прямой или касательной к окружности с осью OX в точке пересечения j -й нормали, γ_j – угол нормали с осью OX .

Формула (18) после упрощений примет вид:

$$\delta_1 h_j = \frac{\cos(\beta_k - \alpha) - \cos(\beta_k - \beta) + (\beta - \alpha) \sin(\beta_k - \beta)}{\sin(\gamma_j - \beta_k)} \delta R. \quad (19)$$

Это только следствие сдвига из-за изменения радиуса. Нужно учесть также поворот касательной в конце дуги (точка С на рис. 5) при изменении радиуса и, как следствие, поворот всех последующих точек сплайна с центром в конце дуги (точка С на рис. 5) на угол $\delta\varphi = -\frac{L}{R^2} \delta R$, где L – длина дуги АС.

Как и при учете поворота из-за изменения длины кривой (12) линейная часть смещения $\delta_2 h_j$ учитывается сдвигом по нормали к прямой (или касательной с окружностью) в точке D пересечения с нормалью на $S\delta\varphi$. Здесь $S = CD$ – радиус поворота.

В соответствии с (12) $\frac{\delta_2 h_j}{\delta\varphi} = \frac{S \cos(\varphi - \beta_k)}{\sin(\gamma_j - \beta_k)}$. Здесь углы с осью OX : φ – прямой CD, β_k – прямой (или касательной), γ_j – пересекаемой нормали.

В итоге получаем

$$\frac{\delta_2 h_j}{\delta\varphi} = \frac{(x_D - x_C) \cos \beta_k + (y_D - y_C) \sin \beta_k}{\sin(\gamma_j - \beta_k)}.$$

Далее:

$$\delta_2 h_j = -\frac{(x_D - x_C) \cos \beta_k + (y_D - y_C) \sin \beta_k}{\sin(\gamma_j - \beta_k) R^2} L \delta R. \quad (20)$$

С учетом (19) и (20) для производной смещения по нормали по радиусу получаем

$$\frac{\partial h_j}{\partial R} = \frac{\cos(\beta_k - \alpha) - \cos(\beta_k - \beta) + (\beta - \alpha) \sin(\beta_k - \beta)}{\sin(\gamma_j - \beta_k)} - \frac{(x_D - x_C) \cos \beta_k + (y_D - y_C) \sin \beta_k}{\sin(\gamma_j - \beta_k) R^2} L. \quad (21)$$

Формулы (13), (17) и (21) можно применять к любой нормали и ко всем элементам сплайна, предшествующим ей. Это означает, что можно вычислить градиент целевой функции (1), не имея ее аналитического выражения через основные переменные.

4. ПОСТРОЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ФУНКЦИИ ЛАГРАНЖА

Рассмотрим вопрос учета ограничений (7), (8) на промежуточные переменные.

Ограничения (7), (8) относительно основных переменных нелинейны, и мы не имеем их конкретных выражений. Но умея вычислять производные промежуточных переменных по основным переменным, можно использовать метод штрафных функций [19, 24], т.е. добавить в целевую функцию слагаемое – штраф за нарушение ограничений. Другими словами, вместо исходной целевой функции строится модифицированная функция Лагранжа (МФЛ), которая учитывает как ограничения равенства, так и не равенства.

Существует несколько вариантов метода, отличающихся видом штрафной функции и методами изменения ее параметров [18, 19, 23, 24].

При решении практических задач хорошие результаты были получены по алгоритму Пауэлла (Powell M.J.D.), в котором для поиска минимума исходной целевой функции $F(\mathbf{x})$ при ограничениях $c_j(\mathbf{x}) \leq 0$, $j = \overline{1, m}$ используется функция

$$\Phi(\mathbf{x}, \boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\theta}) = F(\mathbf{x}) + 1/2 \sum_1^m \sigma_j \left(c_j(\mathbf{x}) + \theta_j \right)_+^2.$$

Здесь \mathbf{x} – вектор неизвестных, $F(\mathbf{x})$ – исходная целевая функция. В нашей задаче компоненты вектора \mathbf{x} – это длины элементов сплайна и радиусы (основные переменные), $c_j(\mathbf{x})$ – неявные функции от \mathbf{x} , но от промежуточных переменных \mathbf{h} они зависят явно (7), (8), и мы умеем вычислять их частные производные. Ограничения (7), (8) всегда можно представить в виде односторонних неравенств.

Векторы $\boldsymbol{\sigma}$ и $\boldsymbol{\theta}$ имеют по m компонент и представляют собой набор параметров штрафной функции, по два параметра на каждое ограничение. Их начальные значения задаются пользователем. Знак «+» означает, что в сумму включаются только те слагаемые, для которых $c_j(\mathbf{x}) + \theta_j > 0$. Здесь $\theta_j > 0$ – «запас» в j -м ограничении, т.е. штрафуются не только настоящее нарушение при $c_j(\mathbf{x}) > 0$, но и $c_j(\mathbf{x}) > -\theta_j$.

Если в системе ограничений были равенства, то соответствующие им слагаемые всегда присутствуют в сумме. Если взять $\theta_j = 0$ и $\sigma_j = k_n$ (k_n задается пользователем), $j = \overline{1, m}$, штрафная функция проще, но ее вторые производные по x_i разрывны на границе допустимой области, причем разрывы тем больше, чем больше k_n , который приходится увеличивать в каждом новом итерационном цикле минимизации, чтобы уменьшить невязки в ограничениях. Иное дело, когда σ_j постоянны, а варьируются только θ_j . В этом случае поверхности разрывов вторых производных удалены от точек минимума, определяемых при решении задач в каждом цикле оптимизации [19].

Начальные значения параметров $\theta_j > 0$ и $\sigma_j > 0$ следует выбирать, ориентируясь на смысл и важность соответствующих ограничений и величины невязок в ограничениях в точке начального приближения. В нашей задаче решение начиналось с $\theta_j = 0.1$ и $\sigma_j = 1$ для всех j .

Затем решалась задача на минимум $\Phi(\mathbf{x}, \boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\theta})$ при простых ограничениях на основные переменные (2), (3), (5), (6) и проверялись ограничения (7), (8). Если были нарушения, то параметры $\boldsymbol{\sigma}$ и $\boldsymbol{\theta}$ менялись по следующему правилу: если j -е ограничение выполнено с «запасом», т.е. $c_j(\mathbf{x}) > -\theta_j$, то новое значение $\theta_j^1 = 0$, а если нет, то $\theta_j^1 = \theta_j + c_j(\mathbf{x})$. Такая замена была проведена для всех ограничений. Для пересчета σ_j применялось другое правило: если в j -м ограничении в результате решения задачи невязка уменьшается быстро, то σ_j не меняется, а если медленно, то увеличивается. Использовались такие константы: если невязка уменьшилась меньше, чем в 4 раза, то соответствующее σ_j умножается на 10, и θ_j делится на 2.

После пересчета параметров процесс повторяется, т.е. делается очередная внешняя итерация. Счет прекращается в следующих случаях:

1. Получено решение с приемлемыми невязками. При этом можно для контроля сделать еще одну

внешнюю итерацию и убедиться, что решение практически не изменилось.

2. После исчерпания заданного лимита внешних итераций решение не получено. При этом есть все основания усомниться в совместности системы ограничений и, следовательно, в существовании решения исходной задачи. Такие ситуации возникали при задании фиксированных точек, через которые невозможно пройти с заданными минимальными значениями длин элементов и радиусов.

5. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Начальное приближение искомого сплайна, полученное с помощью динамического программирования, используется для расчета параметров задачи оптимизации сплайна. Для этого выполняются следующие действия:

1. Последовательно строятся внешние нормали к исходной ломаной в исходных точках и запоминаются их углы с осью OX .
2. Определяются и запоминаются точки пересечения нормалей со сплайном. При этом при больших углах поворота одна нормаль может пересекаться со сплайном в двух точках. В таком случае выбирается точка пересечения, ближайшая к исходной точке.
3. Вычисляются значения всех промежуточных переменных.
4. В каждой точке пересечения нормалей с элементом сплайна (прямой или окружности) вычисляется и запоминается угол с осью OX прямой или касательной к окружности.

Полученных в результате расчетов данных достаточно для расчета градиента МФЛ.

Простой вид ограничений по основным переменным позволяет использовать различные градиентные методы и даже простой метод покоординатного спуска [18, 19]. Так, при использовании метода проекции градиента компоненты градиента, соответствующие переменным, принимающим предельные значения (так называемый активный набор), обнуляются, и применяется стандартный алгоритм [19]. Экспериментально установлено, что при наличии штрафных функций такой метод не гарантирует получение точных решений.

Известно, что наиболее эффективными являются методы второго порядка [19], но для их применения нужно обращать матрицу вторых производных (матрицу Гессе), которую в нашей задаче вычислить не удастся. Поэтому используется метод переменной метрики, так называемая DFP (Дэвидон – Флетчер – Пауэлл) оптимизация. Смысл метода в том, чтобы получить в процессе спуска все более точные

приближения матриц \mathbf{H}_i к обратной матрице Гессе \mathbf{G}^{-1} , используя градиенты целевой функции в уже пройденных итерационных точках [23].

В соответствии с [23, 24], если обозначить: \mathbf{x}_i – итерационную точку, \mathbf{g}_i – градиент, \mathbf{p}_i – направление спуска на i -й итерации и $\mathbf{z}_i = \mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i$, $\mathbf{y}_i = \mathbf{g}_{i+1} - \mathbf{g}_i$, то $\mathbf{H}_0 = \mathbf{E}$, $\mathbf{p}_i = -\mathbf{H}_i \mathbf{g}_i$. При отсутствии ограничений:

$$\mathbf{H}_{i+1} = \mathbf{H}_i + \mathbf{z}_i \mathbf{z}_i^T / (\mathbf{z}_i, \mathbf{y}_i) - \mathbf{H}_i \mathbf{y}_i \mathbf{y}_i^T \mathbf{H}_i / (\mathbf{H}_i \mathbf{y}_i, \mathbf{y}_i^T). \quad (22)$$

Эта формула применима для задач без ограничений. Но в нашей задаче остались ограничения на основные переменные (2), (3), (5), (6). Если в начальном приближении есть предельные длины или радиусы, то нельзя начинать с единичной матрицы \mathbf{E} . Вместо нее должна быть матрица проектирования, которая в нашей задаче строится просто: в \mathbf{E} вместо 1 ставится 0 в тех строках, номера которых совпадают с номерами переменных, принявших предельные значения (активный набор).

При изменении набора активных ограничений матрицу \mathbf{H}_i нужно модифицировать [24], прежде чем вычислять направление спуска. Это происходит как при включении ограничения в активный набор, так и при исключении ограничения из активного набора. Простой вид ограничений позволил существенно упростить соответствующие формулы из [24] за счет отмеченного простого способа построения матрицы проектирования.

DFP оптимизация хорошо работает (в смысле приближения к обратной матрице Гессе) для точек, близких к экстремуму [19, 23, 24]. Поэтому использовалась комбинация методов: простой метод проекции градиента (дает спуск в «овраг») и далее – DFP оптимизация.

6. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ЗАДАЧИ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основной результат работы состоит в том, что задача оптимизации последовательности точек на плоскости сплайном, не являющимся однозначной функцией, решена не эвристическими, а математически корректными методами (динамическое и нелинейное программирование). Многообразие методов нелинейного программирования не позволяет утверждать, что в расчетах использован наиболее эффективный из них. Интерес представляет использование «овражных» алгоритмов [23]. Как утверждает в [23], «овражный» метод сопряженных градиентов, в котором $\mathbf{p}_0 = -\mathbf{g}_0$, $\mathbf{p}_{i+1} = -\mathbf{g}_{i+1} + b_i \mathbf{p}_i$, $b_i = (\mathbf{g}_{i+1} - \mathbf{g}_i, \mathbf{g}_i) / (\mathbf{p}_i, \mathbf{g}_i)$ имеет преимущества при неточной одномерной минимизации и при изгибах «оврага».

В нашей задаче вместо градиента нужно использовать его проекцию и начинать с обновления, т.е. с шага по проекции антиградиента при изменении активного набора.

Есть и более сложные алгоритмы, чем DFP. Например, метод Бройдена, Флетчера, Голдфарба и Шанно [23], в котором в формуле (22) для вычисления матрицы \mathbf{H} добавлено слагаемое $\mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T$, где вектор $\mathbf{v}_i = (\mathbf{y}_i, \mathbf{H}_i)^{1/2} [\mathbf{z}_i / (\mathbf{z}_i, \mathbf{y}_i) - \mathbf{H}_i \mathbf{y}_i / (\mathbf{y}_i, \mathbf{H}_i \mathbf{y}_i)]$.

Целесообразность использования более сложных методов можно установить только экспериментально.

Необходимо отметить, что градиентные методы дают локальный минимум целевой функции. Поэтому для получения начального приближения в нашей задаче особенно важно применение динамического программирования (возможно с повторением расчетов при уменьшении дискретов поиска), т.к. динамическое программирование дает глобальный минимум, если не считать влияние дискретности.

Для борьбы с локальными минимумами использовалась идея спуска из разных точек. После окончания процесса оптимизации выполняется проверка полученного решения. Процесс начинается заново так, как если бы полученное решение было начальным приближением. Все коэффициенты МФЛ принимают исходные значения. На первых итерациях за счет нарушения ограничений по промежуточным переменным их сумма квадратов принимает меньшее значение, но затем меняются коэффициенты МФЛ и исчезают нарушения ограничений. В экспериментальных расчетах в итоге получалось практически то же решение. Конечно, это не гарантия достижения глобального минимума, но это реальный шанс уйти из точки локального минимума. Для выбора наиболее эффективного метода нелинейного программирования при решении рассматриваемой задачи нужны дополнительные экспериментальные исследования.

Основное направление дальнейших исследований состоит в обобщении результатов, полученных для сплайна с окружностями, на более сложную задачу аппроксимации сплайном с клотоидами. Прежде всего предстоит получить формулы для вычисления производных при отсутствии аналитического выражения целевой функции через параметры клотоиды дополнительно к изложенным в настоящей статье формулам для прямых и дуг окружностей.

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Карпов Д.А., Струченков В.И. Двухэтапная сплайн-аппроксимация в компьютерном проектировании трасс линейных сооружений. *Russ. Technol. J.* 2021;9(5): 45–56. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-45-56>
2. 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>
3. Li W., Pu H., Schonfeld P., et al. A method for automatically recreating the horizontal alignment geometry of existing railways. *Comput.-Aided Civ. Inf.* 2019;34(1):71–94. <https://doi.org/10.1111/mice.12392>
4. Jha M.K., McCall C., Schonfeld P. Using GIS, genetic algorithms, and visualization in highway development. *Comput.-Aided Civ. Inf.* 2001;16(6):399–414. <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00242>
5. 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>
6. Jong J.C., Jha M.K., Schonfeld P. Preliminary highway design with genetic algorithms and geographic information systems. *Comput.-Aided Civ. Inf.* 2000;15(4):261–271. <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00190>
7. Kang M.W., Schonfeld P., Yang N. Prescreening and repairing in a genetic algorithm for highway alignment optimization. *Comput.-Aided Civ. Inf.* 2009;24(2): 109–119. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00574.x>
8. Pushak Y., Hare W., Lucet Y. Multiple-path selection for new highway alignments using discrete algorithms. *Eur. J. Oper. Res.* 2016;248(2):415–27. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.039>
9. Sarma K.C., Adeli H. Bilevel parallel genetic algorithms for optimization of large steel structures. *Comput.-Aided Civ. Inf.* 2001;16(5):295–304. <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00234>
10. Shafahi Y., Bagherian M. A customized particle swarm method to solve highway alignment optimization problem. *Comput.-Aided Civ. Inf.* 2013;28(1):52–67. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2012.00769.x>
11. Bosurgi G., D’Andrea A. A polynomial parametric curve (PPC-curve) for the design of horizontal geometry of highways. *Comput.-Aided Civ. Inf.* 2012;27(4):303–312. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2011.00750.x>
12. Cerf R. The quasispecies regime for the simple genetic algorithm with roulette wheel selection. *Adv. Appl. Probability.* 2017;49(3):903–926. <https://doi.org/10.1017/apr.2017.26>
13. Бородакий Ю.В., Загребаев А.М., Крицына Н.А., Кулябичев Ю.П., Шумилов Ю.Ю. *Нелинейное программирование в современных задачах оптимизации.* М.: НИЯУ МИФИ; 2011. 244 с. ISBN 987-5-7262-1451-1
14. Bazaraa M., Sherali Y., Shetty C. *Nonlinear programming. Theory and algorithms.* 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley; 2006. 872 p. ISBN 978-0-471-48600-8
15. Betts J.T. *Practical methods for optimal control using nonlinear programming.* Ser. Advances in Design and Control. Philadelphia: SIAM; 2001. 190 p.
1. Karpov D.A., Struchenkov V.I. Two-stage spline approximation in linear structure routing. *Russ. Technol. J.* 2021;9(5):45–56 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-45-56>
2. Karpov D.A., Struchenkov V.I. Spline approximation of multivalued function in leaner structures routing. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):65–74 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-65-74>
3. Li W., Pu H., Schonfeld P., et al. A method for automatically recreating the horizontal alignment geometry of existing railways. *Comput.-Aided Civ. Inf.* 2019;34(1):71–94. <https://doi.org/10.1111/mice.12392>
4. Jha M.K., McCall C., Schonfeld P. Using GIS, genetic algorithms, and visualization in highway development. *Comput.-Aided Civ. Inf.* 2001;16(6):399–414. <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00242>
5. 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>
6. Jong J.C., Jha M.K., Schonfeld P. Preliminary highway design with genetic algorithms and geographic information systems. *Comput.-Aided Civ. Inf.* 2000;15(4):261–271. <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00190>
7. Kang M.W., Schonfeld P., Yang N. Prescreening and repairing in a genetic algorithm for highway alignment optimization. *Comput.-Aided Civ. Inf.* 2009;24(2): 109–119. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00574.x>
8. Pushak Y., Hare W., Lucet Y. Multiple-path selection for new highway alignments using discrete algorithms. *Eur. J. Oper. Res.* 2016;248(2):415–27. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.039>
9. Sarma K.C., Adeli H. Bilevel parallel genetic algorithms for optimization of large steel structures. *Comput.-Aided Civ. Inf.* 2001;16(5):295–304. <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00234>
10. Shafahi Y., Bagherian M. A customized particle swarm method to solve highway alignment optimization problem. *Comput.-Aided Civ. Inf.* 2013;28(1):52–67. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2012.00769.x>
11. Bosurgi G., D’Andrea A. A polynomial parametric curve (PPC-curve) for the design of horizontal geometry of highways. *Comput.-Aided Civ. Inf.* 2012;27(4):303–312. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2011.00750.x>
12. Cerf R. The quasispecies regime for the simple genetic algorithm with roulette wheel selection. *Adv. Appl. Probability.* 2017;49(3):903–926. <https://doi.org/10.1017/apr.2017.26>
13. Borodakii Yu.V., Zagrebaev A.M., Kritsyna N.A., Kulyabichev Yu.P., Shumilov Yu.Yu. *Nelineinoe programmirovaniye v sovremennykh zadachakh optimizatsii (Nonlinear Programming in Modern Optimization Problem).* Moscow: NIYAU MEPhI; 2008. 244 p. (in Russ.).
14. Bazaraa M., Sherali Y., Shetty C. *Nonlinear programming. Theory and algorithms.* 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley; 2006. 872 p. ISBN 978-0-471-48600-8

16. Lee J., Leyffer S. *Mixed integer nonlinear programming*. NY: Springer; 2011. 707 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1927-3>
17. Sun W., Yuan Y.-X. *Optimization theory and methods. Nonlinear programming*. NY: Springer; 2006. 688 p. <https://doi.org/10.1007/b106451>
18. Струченков В.И. *Методы оптимизации трасс в САПР линейных сооружений*. М.: СОЛОН-Пресс; 2015. 271 с. ISBN 978-5-91359-139-5
19. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. *Практическая оптимизация*: пер. с англ. М.: Мир; 1985. 509 с.
20. Audet C., Hare W. *Derivative-free and blackbox optimization*. Springer Series in Operations Research and Financial Engineering. Springer; 2017. 302 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68913-5>
21. Кохендерфер М.Д., Уилер Т.А. *Алгоритмы оптимизации*. М.: Вильямс; 2020. 528 с.
22. Черноруцкий И.Г. *Методы оптимизации. Компьютерные технологии*. СПб.: БХВ-Петербург; 2011. 329 с.
23. Ларичев О.И., Горвиц Г.Г. *Методы поиска локальных экстремумов овражных функций*. М.: Наука; 1990. 96 с.
24. Гилл Ф., Мюррей У. *Численные методы условной оптимизации*: пер. с англ. М.: Мир; 1977. 296 с.
15. Betts J.T. *Practical methods for optimal control using nonlinear programming*. Ser. Advances in Design and Control. Philadelphia: SIAM; 2001. 190 p.
16. Lee J., Leyffer S. *Mixed integer nonlinear programming*. NY: Springer; 2011. 707 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1927-3>
17. Sun W., Yuan Y.-X. *Optimization theory and methods. Nonlinear programming*. NY: Springer; 2006. 688 p. <https://doi.org/10.1007/b106451>
18. Struchenkov V.I. *Metody optimizatsii trass v SAPR lineinykh sooruzhenii (Methods for route optimization in CAD of linear structures)*. Moscow: SOLON-Press; 2014. 271 p. (in Russ.). ISBN 978-5-91359-139-5
19. Gill F., Myurrei U., Rait M. *Prakticheskaya optimizatsiya (Practical Optimization)*: transl. from Engl. Moscow: Mir; 1985. 509 p. (in Russ.). [Gill Ph.E., Murray W., Wright M.H. *Practical Optimization*. London: Academic Press; 1981. 402 p.]
20. Audet C., Hare W. *Derivative-free and blackbox optimization*. Springer Series in Operations Research and Financial Engineering. Springer International Publishing; 2017. 302p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68913-5>
21. Kochenderfer M.D., Uiler T.A. *Algoritmy optimizatsii (Algorithms for Optimization)*. Moscow: Vil'yams; 2020. 528 p. (in Russ.). [Kochenderfer M.D., Wheeler T.A. *Algorithms for Optimization*. London; The MIT Press; 2019. 520 p.]
22. Chernorutskii I.G. *Metody optimizatsii. Komp'yuternye tekhnologii (Methods of optimization. Computer technologies)*. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2011. 329 p. (in Russ.).
23. Larichev O.I., Gorvits G.G. *Metody poiska lokal'nykh ekstremumov ovrazhnykh funktsii (Methods for Finding Local Extrema of Ravine Functions)*. Moscow: Nauka; 1990. 96 p. (in Russ.).
24. Gill F., Myurrei U. *Chislennyye metody uslovnoi optimizatsii (Numerical methods of conditional optimization)*: transl. from Engl. Moscow: Mir; 1977. 296 p. (in Russ.). [Gill Ph.E., Murray W. *Numerical methods for constrained optimization*. London: Academic Press; 1974. 283 p.]

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, 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 519.224.22
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-84-91>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Экстремум в задаче о парных сравнениях

И.С. Пулькин[@],

А.В. Татаринцев

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

Резюме

Цели. Рассмотрена задача оценки альтернатив на основе результатов экспертных парных сравнений. Важность и актуальность этой задачи обусловлены ее многочисленными применениями в самых разных областях – как в технических и естественных, так и в гуманитарных, от строительства до политики. Ставится задача вычисления вектора объективных рейтингов на основе экспертных оценок. В математической формулировке задача нахождения вектора объективных рейтингов сводится к аппроксимации матриц парных сравнений согласованными матрицами.

Методы. Используются аналитические методы анализа и высшей алгебры. Для некоторых частных случаев приведены результаты численных расчетов.

Результаты. В работе доказана теорема, утверждающая, что согласованная матрица, наилучшим образом аппроксимирующая заданную обратно-симметрическую матрицу в лог-евклидовой метрике, всегда существует и единственна. Кроме того, выведены формулы для вычисления такой согласованной матрицы. Для малых размерностей рассматриваются примеры, позволяющие сравнить результаты, полученные по выведенной формуле, с результатами для других известных способов нахождения согласованной матрицы – для вычисления собственного вектора и для минимизации невязки в лог-чебышевской метрике. Доказано, что в размерности 3 все эти способы приводят к одному и тому же результату, а уже в размерности 4 все результаты различны.

Выводы. Полученные в статье результаты позволяют вычислять вектор объективных рейтингов по данным экспертной оценки. Этот метод может быть использован в стратегическом планировании в тех случаях, когда выводы и рекомендации возможны только на основании экспертных суждений.

Ключевые слова: экспертные оценки, парные сравнения, обратно-симметрическая матрица, согласованная матрица, метрика, минимизация невязки

• Поступила: 08.11.2021 • Доработана: 29.11.2022 • Принята к опубликованию: 22.01.2023

Для цитирования: Пулькин И.С., Татаринцев А.В. Экстремум в задаче о парных сравнениях. *Russ. Technol. J.* 2023;11(2):84–91. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-84-91>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Extremum in the problem of paired comparisons

Igor S. Pulkin[@],

Andrey V. Tatarintsev

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. An analysis of the problem of evaluating alternatives based on the results of expert paired comparisons is presented. The importance and relevance of this task is due to its numerous applications in a variety of fields, whether in the technical and natural sciences or in the humanities, ranging from construction to politics. In such contexts, the problem frequently arises concerning how to calculate an objective ratings vector based on expert evaluations. In terms of a mathematical formulation, the problem of finding the vector of objective ratings can be reduced to approximating the matrices of paired comparisons by consistent matrices.

Methods. Analytical analysis and higher algebra methods are used. For some special cases, the results of numerical calculations are given.

Results. The theorem stating that there is always a unique and consistent matrix that optimally approximates a given inversely symmetric matrix in a log-Euclidean metric is proven. In addition, derived formulas for calculating such a consistent matrix are presented. For small dimensions, examples are considered that allow the results obtained according to the derived formula to be compared with results for other known methods of finding a consistent matrix, i.e., for calculating the eigenvector and minimizing the discrepancy in the log-Chebyshev metric. It is proven that all these methods lead to the same result in dimension 3, while in dimension 4 all results are already different.

Conclusions. The results obtained in the paper allow us to calculate the vector of objective ratings based on expert evaluation data. This method can be used in strategic planning in cases where conclusions and recommendations are possible only on the basis of expert evaluations.

Keywords: expert estimates, paired comparisons, inversely symmetric matrix, consistent matrix, metric, discrepancy minimization

• Submitted: 08.11.2021 • Revised: 29.11.2022 • Accepted: 22.01.2023

For citation: Pulkin I.S., Tatarintsev A.V. Extremum in the problem of paired comparisons. *Russ. Technol. J.* 2023;11(2):84–91. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-84-91>

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

При принятии решений человек не всегда обладает полной информацией, поэтому решения могут приниматься на основании некоторых, не всегда объективных, критериев. В ситуациях, когда необходимо учесть огромное количество факторов, ошибка может привести к катастрофическим последствиям. К таким ситуациям относятся, например, вопросы стратегического планирования, в частности, в строительстве, медицине, политике, экономике и во многих других областях человеческой деятельности.

Науку, занимающуюся вопросами выбора стратегии при неполной информации, а также вопросами

обоснования такого выбора, принято называть теорией принятия решений. Такие исследования привлекают пристальное внимание специалистов в различных областях [1, 2]. Многие аспекты обсуждаются в книгах Т. Саати [3, 4] – одного из основоположников этой теории.

Есть и еще как минимум одна серьезная причина, позволяющая уверенно спрогнозировать рост числа исследований в этом направлении. Это возможность применения методов теории принятия решений в машинном обучении. По сути экспертные оценки – противоречивые и неточные, но при использовании в большом количестве они позволяют получить нужную информацию и построить верный

прогноз – ничем не отличаются от ситуаций, возникающих, например, в обучении нейронных сетей или в построении ансамбля решающих деревьев – случайного леса (random forest) [5].

В последнее время появились многочисленные исследования, в которых техника сравнения разнородных активов применяется к различным задачам из области информационных технологий, в частности, для выбора форматов хранения больших данных (big data) для различных вычислительных комплексов, как локальных, так и распределенных. Этой тематике посвящены, например, работы [6–11].

Достаточно распространена ситуация, когда для построения прогноза и принятия решения не известны ни априорные распределения, ни предшествующая статистика, а известны только прогнозы и рекомендации экспертов. Поэтому задаче обработки экспертных суждений следует придать математическую формулировку.

Пусть мы имеем дело с экспертными суждениями. Например, эксперт сравнивает яблоко (Я), апельсин (А) и банан (Б). При этом он сравнивает фрукты попарно. Допустим, высказаны такие мнения:

- банан в три раза лучше яблока;
- апельсин в пять раз лучше яблока;
- апельсин в два раза лучше банана.

По этим суждениям можно построить матрицу сравнений, в которой первый столбец и первая строка соответствуют яблоку, вторые – банану, а третьи – апельсину:

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}.$$

На пересечении i -го столбца и j -й строки стоит число, равное отношению ценностей i -го и j -го фрукта. Такая матрица называется положительной обратнo-симметрической матрицей: все ее элементы строго положительны и выполнено соотношение:

$$a_{ij} = a_{ji}^{-1}.$$

Эта матрица, однако, не согласована. Если А лучше Я в 5 раз и А лучше Б в 3 раза, то уместно было бы предположить, что Б должен быть лучше Я в 5/3 раза, а не в 2 раза.

Такая ситуация для экспертных оценок – не редкость. Более того, существуют и нетранзитивные оценки: когда А лучше Б, Б лучше В, но В лучше А. Такая ситуация встречается, например, в турнирах, когда А выигрывает у Б, Б выигрывает у В и В выигрывает у А.

Для того, чтобы построить объективную оценку, мы предположим, что для оцениваемых предметов существуют объективные рейтинги w_1, w_2, w_3 ,

а экспертные оценки представляют собой эти же рейтинги, искаженные случайными ошибками. Возникает задача: по данным экспертным оценкам восстановить эти рейтинги.

Если найдены рейтинги w_i , то элементы матрицы сравнений равны

$$x_{ij} = \frac{w_i}{w_j}.$$

Обозначим эту матрицу \mathbf{W}_0 . Ее ранг равен 1. Такая матрица называется согласованной.

Таким образом, задача обработки экспертных суждений сведена к задаче поиска согласованной матрицы \mathbf{W}_0 , наилучшим образом аппроксимирующей обратнo-симметрическую матрицу \mathbf{W} . И здесь выясняется, что ответ существенно меняется в зависимости от того, в какой метрике вычисляется различие между этими матрицами.

В статье Н.К. Кривулина и его учеников [12] предлагается вычислять это различие в лог-чебышевской метрике. Здесь, в частности, отмечается, что это приводит к тому, что задача обработки экспертных оценок становится задачей из области так называемой идемпотентной или тропической математики [13] – нового бурно развивающегося направления в современной математике. Однако там же отмечается, что эта метрика в высоких размерностях приводит к неединственности решения.

В работах Т. Саати [3, 4] предлагается считать искомым вектором рейтингов соответствующим образом нормированный собственный вектор матрицы \mathbf{A} , отвечающий ее максимальному собственному значению. Существует известная теорема Перрона – Фробениуса [14], утверждающая, что у любой положительной (состоящей только из положительных чисел) матрицы существует единственное максимальное по модулю собственное значение, оно строго положительно и кратность его равна 1. В этих работах, впрочем, не указывается, в какой метрике полученное решение оптимально.

Настоящая работа посвящена нахождению оптимального решения в лог-евклидовой метрике.

ВЫВОД ОПТИМАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ

Рассмотрим матрицу сравнения произвольной размерности ($n \times n$). Невязка исходной матрицы сравнения $\mathbf{W} = (a_{ij})$ и ее согласованного аналога $\mathbf{W}_0 = (x_{ij})$ в лог-евклидовой метрике, которую мы в данный момент рассматриваем, вычисляется как:

$$\Phi = \sum_{i,j=1}^n \log^2 \left(\frac{x_{ij}}{a_{ij}} \right).$$

Если учесть, что элементы согласованной матрицы выражаются через компоненты собственного вектора матрицы в виде $x_{ij} = w_i/w_j$, то функция Φ зависит от n переменных:

$$\Phi(w_1, \dots, w_n) = \sum_{i,j=1}^n \log^2 \left(\frac{w_i}{w_j a_{ij}} \right).$$

Условия равенства нулю производной функции невязки по k -й компоненте собственного вектора w_k дадут систему уравнений:

$$n \log w_k - \sum_{\beta=1}^n \log w_{\beta} = \sum_{\beta=1}^n \log a_{k\beta}.$$

Решением этой системы уравнений будет:

$$w_k = N \prod_{\beta=1}^n (a_{k\beta})^{1/n}.$$

Здесь N – произвольный нормировочный коэффициент и учтено, что произведение всех элементов исходной обратно-симметрической матрицы сравнений равно единице

$$\prod_{\alpha,\beta=1}^n a_{\alpha\beta} = 1.$$

Таким образом, доказано следующее утверждение.

Теорема. Пусть задана обратно-симметрическая матрица (a_{ij}) . Тогда компоненты согласованной матрицы (x_{ij}) , минимизирующей функцию невязки для лог-евклидовой метрики, имеют вид:

$$x_{ij} = \frac{w_i}{w_j} = \prod_{\beta=1}^n (a_{i\beta} \cdot a_{\beta j})^{1/n}.$$

Иными словами, элемент согласованной матрицы x_{ij} равен произведению среднего геометрического элементов i -й строки и j -го столбца исходной матрицы.

Для примера рассмотрим обратно-симметрические матрицы малых размерностей.

Пусть $\mathbf{W} = (a_{ij})$ – трехмерная матрица экспертных сравнений:

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} 1 & a & b \\ 1/a & 1 & c \\ 1/b & 1/c & 1 \end{pmatrix}.$$

Элементы матрицы положительны $a_{ij} > 0$ и обратно-симметричны $a_{ij} = a_{ji}^{-1}$. Отметим, что матрица называется согласованной, если для ее элементов $a, b, c > 0$ выполняется условие $c = b/a$ или $ac/b = 1$. Для аналогичного параметра в работе [12] было использовано название «тропический радиус» и использовалось обозначение $R = (ac/b)^{1/3}$, которое мы будем также использовать и в этой работе.

В работе [15] установлено, что собственные значения матрицы сравнений для $n = 3$:

$$\lambda_1 = 1 + \left(R + \frac{1}{R} \right);$$

$$\lambda_2 = \lambda_3 = 1 - \frac{1}{2} \left(R + \frac{1}{R} \right) \pm \frac{i\sqrt{3}}{2} \left(R - \frac{1}{R} \right).$$

Один из корней характеристического уравнения действительный, пара других – комплексно-сопряженные. Действительный корень имеет наибольшее по абсолютной величине значение. Для согласованной матрицы $R = 1$ и собственные значения равны $\lambda_1 = 3; \lambda_2 = \lambda_3 = 0$. Наибольшее ненулевое собственное значение совпадает в общем случае с размерностью матрицы сравнения.

Нетрудно найти и собственный вектор исходной матрицы сравнений для первого собственного значения. Он будет иметь вид (в нормировке $w_1 = 1$):

$$\begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ R/a \\ 1/bR \end{pmatrix}.$$

Элементы согласованной матрицы в этом случае находятся следующим образом: $\mathbf{W}_0 = (x_{ij}) = w_i/w_j$ и, следовательно:

$$\mathbf{W}_0 = \begin{pmatrix} 1 & a/R & bR \\ R/a & 1 & c/R \\ 1/bR & R/c & 1 \end{pmatrix}.$$

Найденный собственный вектор исходной матрицы будет собственным и для согласованной матрицы. Он соответствует собственному значению этой матрицы, равному размерности $\lambda = 3$.

Для трехмерной матрицы сравнений и соответствующей ей согласованной матрицы:

$$\mathbf{W} = (a_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & a & b \\ 1/a & 1 & c \\ 1/b & 1/c & 1 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{W}_0 = (x_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & x & y \\ 1/x & 1 & y/x \\ 1/y & x/y & 1 \end{pmatrix}$$

в лог-евклидовой метрике задача сводится к нахождению минимума функции невязки $\Phi(x, y)$ двух переменных, входящих в согласованную матрицу:

$$\Phi(x, y) = \sum_{i,j=1}^3 (\log a_{ij} - \log x_{ij})^2,$$

которая с учетом явного вида матриц может быть записана в виде:

$$\Phi(x, y) = 2 \log^2 \left(\frac{x}{a} \right) + 2 \log^2 \left(\frac{y}{b} \right) + 2 \log^2 \left(\frac{y}{cx} \right).$$

Экстремум функции (минимум) достигается в точке $x = a/R, y = bR$. Минимальное значение функции $\min \Phi = 6 \log^2 R$ зависит от рассогласованности исходной матрицы экспертных суждений.

Результаты для трехмерного случая можно получить и другим способом.

Как и ранее, обратнo-симметрическая матрица в трехмерном случае равна

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} 1 & a & b \\ 1/a & 1 & c \\ 1/b & 1/c & 1 \end{pmatrix}.$$

При логарифмировании она становится кососимметрической

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0 & u & v \\ -u & 0 & w \\ -v & w & 0 \end{pmatrix}.$$

Здесь обозначено $u = \log a, v = \log b, w = \log c$.
Согласованная матрица имеет вид

$$\mathbf{W}_0 = \begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_2/w_1 & w_3/w_1 \\ w_1/w_2 & w_2/w_2 & w_3/w_2 \\ w_1/w_3 & w_2/w_3 & w_3/w_3 \end{pmatrix}.$$

После логарифмирования она примет вид:

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} 0 & y_1 & y_2 \\ -y_1 & 0 & y_3 \\ -y_2 & -y_3 & 0 \end{pmatrix}.$$

Здесь обозначено:

$$y_1 = \log w_2 - \log w_1, \quad y_2 = \log w_3 - \log w_1, \\ y_3 = \log w_3 - \log w_2.$$

При этом выполнено условие $y_1 - y_2 + y_3 = 0$. Таким образом, задача свелась к нахождению точки \mathbf{Q} на плоскости $y_1 - y_2 + y_3 = 0$, ближайшей

к заданной точке $\mathbf{P}(u, v, w) \in \mathbb{R}^3$. Решение этой задачи зависит от метрики.

Для евклидовой метрики следует провести через точку \mathbf{P} прямую, перпендикулярную плоскости, и найти точку пересечения:

$$(u + t) - (v - t) + (w + t) = 0.$$

Получим:

$$t = -\frac{1}{3}(u - v + w).$$

Следовательно:

$$y_1 = u + t = \frac{2}{3}u + \frac{1}{3}v - \frac{1}{3}w, \quad y_2 = v - t = \frac{1}{3}u + \frac{2}{3}v + \frac{1}{3}w, \\ y_3 = w + t = -\frac{1}{3}u + \frac{1}{3}v + \frac{2}{3}w.$$

Положим без ограничения общности $w_1 = 1$. Тогда

$$w_2 = e^{y_1} = a^{2/3}b^{1/3}c^{-1/3}, \\ w_3 = e^{y_2} = a^{1/3}b^{2/3}c^{1/3}.$$

Это элементы первой строки согласованной матрицы. В первом столбце стоят обратные им элементы. Первый столбец равен

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} 1 \\ a^{-2/3}b^{-1/3}c^{1/3} \\ a^{-1/3}b^{-2/3}c^{-1/3} \end{pmatrix},$$

что совпадает с результатом, полученным ранее

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} 1 \\ R/a \\ 1/bR \end{pmatrix}.$$

Этот столбец (как и два других) является собственным вектором исходной матрицы \mathbf{A} . Это нетрудно проверить прямой выкладкой. К сожалению, такой способ расчета не обобщается на более высокие размерности.

Рассмотрим также другие метрики. Наиболее естественным представляется рассмотреть самые употребительные: лог-манхеттенскую и лог-чебышевскую метрики.

Нетрудно проиллюстрировать, что в лог-манхеттенской метрике решение не является единственным даже в размерности 3. Действительно, геометрически решение задачи о минимальном расстоянии от точки до плоскости сводится к построению шара

с центром в этой точке, касающегося этой плоскости. Однако в манхеттенской метрике «шаром» является октаэдр, одна из граней которого лежит как раз на плоскости $y_1 - y_2 + y_3 = 0$. Все точки этой грани и будут решениями. К этому можно добавить, что решение в евклидовой метрике будет принадлежать этой же грани, т.е. будет одним из решений в манхеттенской.

В чебышевской метрике в размерности 3 решение единственно и совпадает с решением в евклидовой. Действительно, «шаром» в этой метрике является куб. Вектор PQ имеет координаты $(t, -t, t)$ и является половиной диагонали куба, поэтому куб также касается плоскости в единственной точке – точке Q .

В работе [12] также было получено другим способом, что в размерности 3 собственный вектор минимизирует невязку в лог-чебышевской метрике.

Таким образом, в размерности 3 все описанные способы вычисления согласованной матрицы – вычисление собственного вектора и вычисление вектора, минимизирующего невязку – приводят к одному и тому же результату (хотя в лог-манхеттенской метрике это решение не будет единственным).

В размерности 4 эти решения уже отличаются.

В работе [12] для размерности 4 рассматривается численный пример с такой матрицей:

$$D = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 4 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1/2 & 1/3 \\ 1/4 & 2 & 1 & 2 \\ 1 & 3 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}.$$

В указанной работе доказывается, что оптимальным в лог-чебышевской метрике будет любой вектор, принадлежащий отрезку AB , где

$$A = \begin{pmatrix} 1 \\ 1/4 \\ 1/2 \\ 1/2 \end{pmatrix} \text{ и } B = \begin{pmatrix} 1 \\ 1/3 \\ 1/2 \\ 1/2 \end{pmatrix}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробов В.Б. *Теория и практика экспертных методов*. М.: ИНФРА-М; 2019. 279 с. ISBN 978-5-16-015053-6. https://doi.org/10.12737/monography_5cae0067f1835.43206494
2. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. *Анализ, синтез, планирование решений в экономике*. М.: Финансы и статистика; 2004. 467 с. ISBN 5-279-02901-7
3. Саати Т. *Принятие решений. Метод анализа иерархий*. М.: Радио и связь; 1993. 314 с. ISBN 5-256-00443-3

Таким образом, в лог-чебышевской метрике в размерности 4 решение, вообще говоря, не единственно.

Другой способ – вычисление собственного вектора – приводит к такому результату: собственное значение равно $\lambda_{\max} = 4.5056$, а собственный вектор в той нормировке, когда его первая координата равна 1, равен

$$V = \begin{pmatrix} 1.0000 \\ 0.2837 \\ 0.5818 \\ 0.6110 \end{pmatrix}.$$

Вычисление решения, дающего минимальную невязку в лог-евклидовой метрике, в соответствии с доказанной выше теоремой, приводит к такому результату:

$$V = \begin{pmatrix} 1.0000 \\ 0.3195 \\ 0.5946 \\ 0.6580 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, уже в размерности 4 описанные выше способы вычисления вектора рейтингов приводят к различным результатам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обработки экспертных мнений и приведения их к виду рейтингового списка можно использовать доказанную в статье теорему. Установлено, что она дает наилучшую оценку в лог-евклидовой метрике. На примерах показано, что эта оценка в высоких размерностях может не совпадать с оценками, полученными другими способами. Выбор нужного способа, по-видимому, должен быть связан со спецификой рассматриваемой задачи.

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

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

REFERENCES

1. Korobov V.B. *Teoriya i praktika ekspertnykh metodov (Theory and Practice of Expert Methods)*. Moscow: INFRA-M; 2019. 279 p. (in Russ.). ISBN 978-5-16-015053-6. https://doi.org/10.12737/monography_5cae0067f1835.43206494
2. Andreichikov A.V., Andreichikova O.N. *Analiz, sintez, planirovanie reshenii v ekonomike (Analysis, Synthesis, Planning of Decisions in the Economy)*. Moscow: Finansy i statistika; 2004. 467 p. (in Russ.). ISBN 5-279-02901-7

4. Саати Т. *Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети*. М.: URSS; 2010. 357 с. ISBN 978-5-397-01622-3
5. Breiman L. Random forests. *Machine Learning*. 2001;45(1): 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
6. Belov V., Tatarintsev A., Nikulchev E. Comparative characteristics of big data storage formats. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021;1727(1):012005. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1727/1/012005>
7. Belov V., Tatarintsev A., Nikulchev E. Choosing a data storage format in the Apache Hadoop system based on experimental evaluation using Apache Spark. *Symmetry*. 2021;13(2):195. <https://doi.org/10.3390/sym13020195>
8. Moro Visconti R., Morea D. Big data for the sustainability of healthcare project financing. *Sustainability*. 2019;11(13):3748. <https://doi.org/10.3390/su11133748>
9. Gusev A., Ilin D., Nikulchev E. The dataset of the experimental evaluation of software components for application design selection directed by the artificial bee colony algorithm. *Data*. 2020;5(3):59. <https://doi.org/10.3390/data5030059>
10. Munir R.F., Abelló A., Romero O., Thiele M., Lehner W. A cost-based storage format selector for materialized results in big data frameworks. *Distrib. Parallel Databases*. 2020;38(3):335–364. <https://doi.org/10.1007/s10619-019-07271-0>
11. Gusev A., Ilin D., Kolyasnikov P., Nikulchev E. Effective selection of software components based on experimental evaluations of quality of operation. *Eng. Lett.* 2020;28(2):420–427.
12. Кривулин Н.К., Агеев В.А., Гладких И.В. Применение методов тропической оптимизации для оценки альтернатив на основе парных сравнений. *Вестник СПбГУ. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. 2017;13(1):27–41. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2017.103>
13. Литвинов Г.Л. Деквантование Маслова, идемпотентная и тропическая математика: краткое введение. *Записки научных семинаров Санкт-Петербургского отделения математического института им. В.А. Стеклова РАН (Записки научных семинаров ПОМИ)*. 2005;326(13):145–182.
14. Гантмахер Ф.Р. *Теория матриц*. М.: Физматлит; 2004. 560 с. ISBN 5-9221-0524-8
15. Евсева О.А., Пулькин И.С., Татаринцев А.В. О задаче обработки экспертных суждений. *Инновационные технологии в электронике и приборостроении: сборник трудов конференции*. М.: РТУ МИРЭА; 2021. Т. 1. С. 355–359.
3. Saaty T. *Prinyatie reshenii. Metod analiza ierarkhii (Decision Making. Hierarchy Analysis Method)*. Moscow: Radio i svyaz'; 1993. 341 p. (in Russ.). ISBN 5-256-00443-3
4. Saaty T. *Prinyatie reshenii pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh: analiticheskie seti (Decision Making with Dependencies and Feedbacks: Analytical Networks)*. Moscow: URSS; 2010. 357 p. (in Russ.). ISBN 978-5-397-01622-3
5. Breiman L. Random forests. *Machine Learning*. 2001;45(1): 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
6. Belov V., Tatarintsev A., Nikulchev E. Comparative characteristics of big data storage formats. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021;1727(1):012005. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1727/1/012005>
7. Belov V., Tatarintsev A., Nikulchev E. Choosing a data storage format in the Apache Hadoop system based on experimental evaluation using Apache Spark. *Symmetry*. 2021;13(2):195. <https://doi.org/10.3390/sym13020195>
8. Moro Visconti R., Morea D. Big data for the sustainability of healthcare project financing. *Sustainability*. 2019;11(13):3748. <https://doi.org/10.3390/su11133748>
9. Gusev A., Ilin D., Nikulchev E. The dataset of the experimental evaluation of software components for application design selection directed by the artificial bee colony algorithm. *Data*. 2020;5(3):59. <https://doi.org/10.3390/data5030059>
10. Munir R.F., Abelló A., Romero O., Thiele M., Lehner W. A cost-based storage format selector for materialized results in big data frameworks. *Distrib. Parallel Databases*. 2020;38(3):335–364. <https://doi.org/10.1007/s10619-019-07271-0>
11. Gusev A., Ilin D., Kolyasnikov P., Nikulchev E. Effective selection of software components based on experimental evaluations of quality of operation. *Eng. Lett.* 2020;28(2):420–427.
12. Krivulin N.K., Ageev V.A., Gladkikh I.V. Application of methods of tropical optimization for evaluating alternatives based on pairwise comparisons. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya = Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*. 2017;13(1):27–41. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2017.103>
13. Litvinov G.L. The Maslov dequantization, idempotent and tropical mathematics: a brief introduction. *Zapiski nauchnykh seminarov Sankt-Peterburgskogo otdeleniya matematicheskogo instituta im. V.A. Steklova RAN (Zapiski Nauchnykh Seminarov POMI)*. 2005;326(13):145–182 (in Russ.).
14. Gantmakher F R. *Teoriya matrits (Matrix Theory)*. Moscow: Fizmatlit; 2004. 560 p. (in Russ.). ISBN 5-9221-0524-8
15. Evseeva O.A., Pulkin I.S., Tatarintsev A.V. On the problem of processing expert judgments. In: *Innovatsionnye tekhnologii v elektronike i priborostroenii: sbornik trudov konferentsii (Innovative technologies in electronics and instrumentation: collection of conference proceedings)*. Moscow: MIREA; 2021. V. 1. P. 355–359 (in Russ.).

Об авторах

Пулькин Игорь Сергеевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры высшей математики Института искусственного интеллекта, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: pulkin@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 3381-669, <https://orcid.org/0000-0002-5907-2151>

Татаринцев Андрей Владимирович, к.ф.-м.н., доцент кафедры высшей математики и программирования Института перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID 57221996001, 7004076246, <https://orcid.org/0000-0003-2969-8740>

About the authors

Igor S. Pulkin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Higher Mathematics Department, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: pulkin@mirea.ru. RSCI SPIN-code 3381-669, <https://orcid.org/0000-0002-5907-2151>

Andrey V. Tatarintsev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Higher Mathematics and Programming, Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). Scopus Author ID 57221996001, 7004076246, <https://orcid.org/0000-0003-2969-8740>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 534-16
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-92-99>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Идентификация продольного надреза стержня по собственным частотам колебаний

И.М. Утяшев^{1, 2},
А.Ф. Фатхелисламов^{3, @}

¹ Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, 450054 Россия

² Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, 450001 Россия

³ Уфимский университет науки и технологий, Уфа, 450076 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: alfir93@mail.ru

Резюме

Цели. Цели работы: рассмотреть прямую и обратную задачу о колебании прямоугольного стержня с продольным надрезом; исследовать закономерности поведения собственных частот и собственных форм продольных колебаний при изменении места и размера надреза; разработать метод, позволяющий однозначно идентифицировать параметры продольного надреза с помощью собственных частот продольных колебаний стержня.

Методы. Стержень с продольным надрезом моделируется как два стержня, где первый не имеет надреза, а второй – имеет. Для соединения используются условия сопряжения, в которых приравниваются продольные колебания и деформации. Решение обратной задачи основано на построении частотного уравнения в предположении, что искомые параметры входят в уравнение. При подстановке собственных частот в это уравнение получим нелинейную систему относительно неизвестных параметров. Решение последнего есть искомые параметры надреза.

Результаты. Приведены таблицы собственных частот и графики собственных форм для разных параметров надреза. Получены и проанализированы результаты для различных краевых условий. Представлен метод идентификации параметров надреза по конечному числу собственных частот. Показано, что обратная задача имеет два решения, симметричных относительно центра стержня. Для однозначного решения требуются собственные частоты той же задачи с другими граничными условиями на правом конце. Добавление дополнительных условий на концах стержня позволило решить обратную задачу с новыми краевыми условиями, дающими возможность построить точное решение и разработать алгоритм проверки однозначности решения.

Выводы. Разработанный метод позволяет решить задачу идентификации геометрических параметров различных деталей и конструкций, моделируемых стержнями.

Ключевые слова: продольные колебания, собственная частота, собственная форма, стержень, задача идентификации, прямая задача, обратная задача, задача Штурма – Лиувилля, граничные условия

• Поступила: 24.07.2022 • Доработана: 06.09.2022 • Принята к опубликованию: 22.01.2023

Для цитирования: Утяшев И.М., Фатхелисламов А.Ф. Идентификация продольного надреза стержня по собственным частотам колебаний. *Russ. Technol. J.* 2023;11(2):92–99. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-92-99>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Identification of a longitudinal notch of a rod by natural vibration frequencies

Ilnur M. Utyashev^{1, 2},
Alfir F. Fatkhelislamov^{3, @}

¹ *Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Ufa, 450054 Russia*

² *Bashkir State Agrarian University, Ufa, 450001 Russia*

³ *Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450076 Russia*

@ *Corresponding author, e-mail: alfir93@mail.ru*

Abstract

Objectives. To study the direct and inverse problem of vibrations of a rectangular rod having a longitudinal notch, to analyze regularities of the behavior of natural frequencies and natural forms of longitudinal vibrations when changing the location and size of the notch, and to develop a method for uniquely identifying the parameters of the longitudinal notch using the natural frequencies of longitudinal vibrations of the rod.

Methods. The rod with a longitudinal notch is modeled as two rods, where the first one does not have a notch, while the second one does. For connection, conjugation conditions are used, in which longitudinal vibrations and deformations are equated. The solution of the inverse problem is based on the construction of a frequency equation under the assumption that the desired parameters are included in the equation. Substituting natural frequencies into this equation, the nonlinear system with respect to unknown parameters is derived. The solution of the latter is the desired notch parameters.

Results. Tables of eigenfrequencies and graphs of eigenforms are given for different notch parameters. The results for different boundary conditions are obtained and analyzed. A method for identifying notch parameters by a finite number of eigenfrequencies is presented. The inverse problem is shown to have two solutions, which are symmetrical about the center of the rod. The unambiguous solution requires eigenfrequencies of the same problem with different boundary conditions at the right end. By adding additional conditions at the ends of the rod, the inverse problem can be solved with new boundary conditions to construct the exact solution and develop an algorithm for checking the uniqueness of the solution.

Conclusions. The developed method can be used to solve the problem of identification of geometric parameters of various parts and structures modeled by rods.

Keywords: longitudinal vibrations, natural frequency, eigenform, rod, identification problem, direct problem, inverse problem, Sturm–Liouville problem, boundary conditions

• Submitted: 24.07.2022 • Revised: 06.09.2022 • Accepted: 22.01.2023

For citation: Utyashev I.M., Fatkhelislamov A.F. Identification of a longitudinal notch of a rod by natural vibration frequencies. *Russ. Technol. J.* 2023;11(2):92–99. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-92-99>

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

Колебания являются одной из наиболее распространенных форм движения. Изучение колебаний имеет важное практическое значение, т.к. позволяет использовать их положительные свойства в технике и технологии, избежать нежелательных последствий колебаний путем ограничения их уровня. Лишь на базе глубокого изучения различных видов колебаний могут быть решены важные практические проблемы динамики сооружений [1]. Изучение собственных частот колебаний представляет большой научный и прикладной интерес во многих инженерных задачах.

Идентификации трещин посвящено большое число работ [2–14]. Поперечные раскрытые трещины, начиная с работ [3–5], как правило, моделируются условиями сопряжения пружины. В современной литературе предлагаются и другие условия сопряжения для моделирования поперечных трещин [2, 6, 7]. Однако продольная трещина не может быть смоделирована условиями сопряжения. В работе [2] предложено решить задачу идентификации стержня, основываясь на изменении в месте надреза моментов инерций вокруг осей и площадей поперечного сечения. Работа [8] приводит простейшую модель продольных колебаний стержня с зарождающимися поперечными трещинами, в ней определяются собственные частоты колебаний, а также координаты и размеры трещин по экспериментальным значениям собственных частот. В работе [9] рассмотрен стержень с жестко закрепленным левым концом, закрепление на правом конце может быть либо свободным, либо упругим или жестким. Приведены первые три собственные частоты для различных профилей сечения. Наиболее близкая по постановке задача приведена в работе [10], где рассматривается эволюция характеристик собственных продольных колебаний и собственных форм круглого стержня

при увеличении дефекта его поперечного сечения. Работа [14] посвящена методу решения обратных задач дефектоскопии для стержней, совершающих продольные колебания. С помощью численного моделирования показано, что для удовлетворительного определения свойств дефекта достаточно использовать несколько низших частот. В [15] проведено сравнение экспериментальных данных с различными теоретическими моделями для описания продольных колебаний стержня. В настоящей работе получен результат для случая, когда продольный надрез проходит не по всей длине прямоугольного стержня. Результаты исследования могут найти применение в акустической диагностике различных стержней, таких, как двутавровая балка, рельсы, каркасные мосты, и т.д.

Результаты работы показали, что с помощью собственных частот продольных колебаний можно найти место начала продольного надреза стержня, его глубину и ширину. Изучение графиков собственных форм колебаний позволяет изучить зависимость выходных данных задачи от входных.

ПРЯМАЯ ЗАДАЧА

Рассматривается однородный изотропный прямоугольный стержень длиной $L = 1$, плотностью ρ и площадью поперечного сечения F (см. рис. 1). Краевые условия: стержень заделан на левом конце и свободен на правом. Поперечное сечение стержня имеет высоту H и ширину B . От точки x_c до правого конца расположен прямоугольный надрез глубиной h и шириной b .

Требуется определить собственные частоты продольных колебаний стержня, определить влияние размеров и места начала надреза на эти частоты. Для наглядности решения построим собственные формы колебаний.

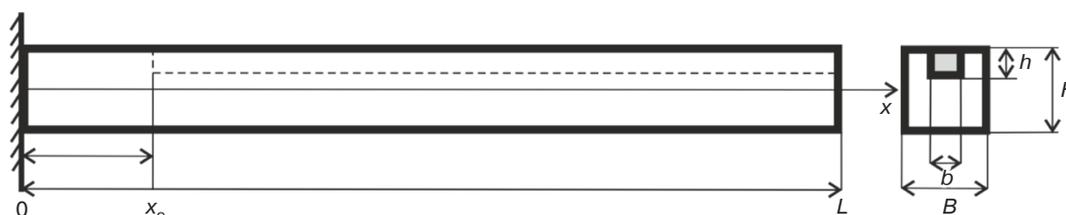


Рис. 1. Изображение стержня с надрезом

Уравнение продольных колебаний описывается следующим уравнением [11, с. 189]:

$$EF \frac{d^2 U(x,t)}{dx^2} + \rho F \frac{d^2 U(x,t)}{dt^2} = 0, \quad (1)$$

где $U = U(x, t)$ – продольное смещение, EF – изгибная жесткость стержня, ρ – плотность стержня, F – площадь поперечного сечения стержня.

Решение уравнения (1) ищем в виде $U(x, t) = y(x)\cos\omega t$. Тогда (1) сводится к следующему уравнению:

$$y'' + \lambda^2 y = 0, \quad (2)$$

где спектральный параметр $\lambda^2 = \frac{\rho F \omega^2}{E}$. Поскольку стержень слева и справа от точки x_c имеет разную форму поперечного сечения, то уравнения продольных колебаний слева и справа от точки x_c запишутся в следующей форме:

$$y''_- + \lambda^2 y_- = 0, \quad y''_+ + \lambda^2 y_+ = 0, \quad (3)$$

где y_-, y_+ – продольные смещения левее и правее точки x_c .

Условие сопряжения в точке x_c для участков стержня запишется так:

$$EF_- \frac{dy_-}{dx} = EF_+ \frac{dy_+}{dx}. \quad (4)$$

Обозначим отношение площадей $\frac{F_+}{F_-}$ через P :

$$F_+ = BH - bh, \quad F_- = BH, \quad P = \frac{F_+}{F_-}. \quad (5)$$

Условия сопряжения с помощью P запишутся так:

$$y_-(x_c) = y_+(x_c), \quad y'_-(x_c) = y'_+(x_c)P. \quad (6)$$

Так как стержень заделан на левом конце и свободен на правом, то краевые условия запишутся в следующей форме:

$$y_-(0) = 0, \quad y'_+(1) = 0. \quad (7)$$

Общее решение уравнений (3) есть:

$$y_- = C_1^- \cos \lambda x + C_2^- \frac{\sin \lambda x}{\lambda},$$

$$y_+ = C_1^+ \cos \lambda x + C_2^+ \frac{\sin \lambda x}{\lambda}. \quad (8)$$

Уравнения (8) подставим в (6), (7) и получим следующие уравнение:

$$y_-(0) = C_1^- + C_2^- = 0. \quad (9)$$

Из уравнения (9) следует $C_1^- = 0$.

$$y'_+(1) = -\lambda C_1^+ \sin \lambda + C_2^+ \cos \lambda = 0. \quad (10)$$

$$C_1^- + C_2^- \frac{\sin \lambda x_c}{\lambda} - C_1^+ \cos \lambda x_c - C_2^+ \frac{\sin \lambda x_c}{\lambda} = 0. \quad (11)$$

$$-\lambda C_1^- + C_2^- \cos \lambda x_c - P(-\lambda C_1^+ \sin \lambda x_c + C_2^+ \cos \lambda x_c) = 0. \quad (12)$$

Система уравнений (10)–(12) для нахождения констант C_1^+, C_2^+, C_2^- имеет ненулевое решение тогда и только тогда, когда равен нулю определитель системы

$$D = \begin{vmatrix} 0 & -\lambda \sin \lambda & \cos \lambda \\ \frac{\sin \lambda x_c}{\lambda} & -\cos \lambda x_c & -\frac{\sin \lambda x_c}{\lambda} \\ \cos \lambda x_c & P \lambda \sin \lambda x_c & -P \cos \lambda x_c \end{vmatrix} = 0. \quad (13)$$

В результате получаем следующее уравнение для нахождения собственных значений (собственных частот):

$$D = -\lambda \sin \lambda \cos \lambda x_c \sin \lambda x_c P + \cos \lambda \sin^2 \lambda x_c + \sin \lambda \cos \lambda x_c \sin \lambda x_c + \cos^2 \lambda x_c \cos \lambda = 0. \quad (14)$$

На основе этого уравнения можно решать два вида задач – прямую и обратную.

Решение прямой задачи с различными начальными данными позволяет сделать анализ зависимости собственных частот колебаний от параметров стержня, а также сделать основные выводы по решению поставленной задачи. Поэтому следующим этапом работы является анализ результатов прямой задачи.

Величины измерения обезразмерены для удобного выполнения расчетов.

Начальные данные: $H = B = 0.1$; $h = b = 0.01$.

Необходимо найти собственные частоты продольных колебаний.

Рассмотрим зависимость первых пяти собственных частот от положения начала надреза стержня.

В значениях x_c , равноудаленных от середины (1, 2, 5, 7 в табл. 1), можно увидеть одинаковые значения частот продольных колебаний. Отсюда следует, что решение обратной задачи двойственно, т.е. существуют два решения симметрично середине

стержня. Наглядно посмотреть двойственность решения можно, построив первые три собственные формы функции (рис. 2–4).

Таблица 1. Значения собственных частот продольных колебаний при изменении места надреза

№	Положение x_c	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
1	0.1	1.57389	4.72052	7.86408	11.00378	14.14031
2	0.25	1.57791	4.71956	7.84681	10.98846	14.14428
3	0.3	1.57895	4.71552	7.84388	10.99868	14.14536
4	0.5	1.58090	4.70229	7.86408	10.98547	14.14727
5	0.75	1.57791	4.71956	7.84681	10.98846	14.14428
6	0.8	1.57670	4.72201	7.85398	10.98595	14.13126
7	0.9	1.57389	4.72052	7.86408	11.00378	14.14031

Примечание: λ_n – собственные частоты продольных колебаний стержня, которые найдены численно в программе Maple¹.

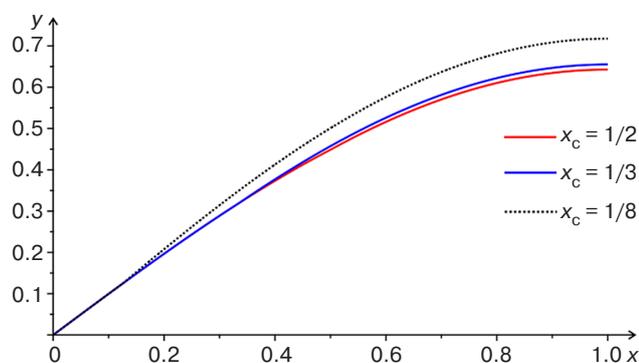


Рис. 2. Первая собственная форма

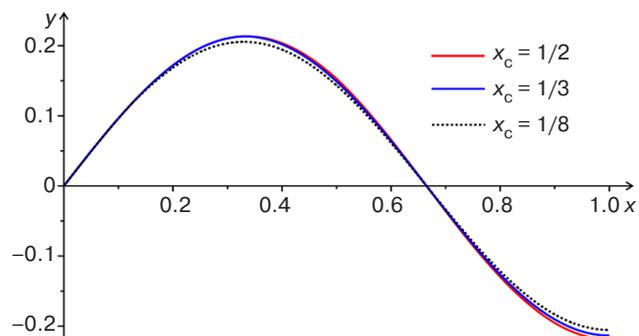


Рис. 3. Вторая собственная форма

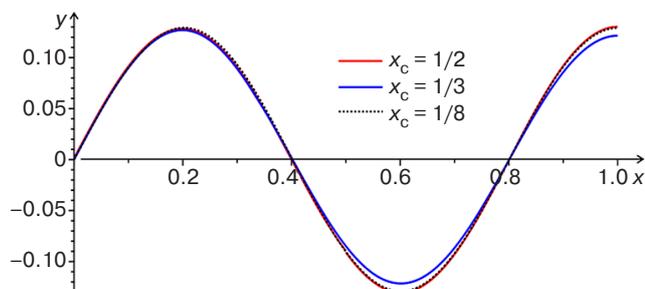


Рис. 4. Третья собственная форма

Из графиков собственных форм (рис. 2–4) видно, что задача идентификации точки начала надреза неустойчива, сильно зависит от погрешности входных данных.

Рассмотрим изменения собственной частоты от высоты h и ширины b надреза стержня.

Из таблиц 2 и 3 видно, что изменение размеров надреза ведет к более существенному изменению собственных частот колебаний, чем изменение места надреза.

Таблица 2. Изменение значения чистоты собственных колебаний от увеличения высоты надреза

№	Высота h	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
1	0.01	1.57582	4.70736	7.85901	10.9905	14.14219
2	0.02	1.58090	4.70229	7.86408	10.9854	14.14727
3	0.04	1.59120	4.69198	7.87439	10.9752	14.15758
4	0.05	1.59644	4.68675	7.87963	10.9699	14.16281
5	0.06	1.60173	4.68146	7.88491	10.9646	14.16810
6	0.08	1.61247	4.67071	7.89566	10.9539	14.17884
7	0.09	1.61793	4.66525	7.90112	10.9484	14.18430

Таблица 3. Изменение частоты продольных колебаний от положения и высоты надреза стержня

№	Положение x_c	Высота h	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
1	0.9	0.09	1.58485	4.74968	7.90108	11.03455	14.15227
2	0.1	0.01	1.57234	4.71644	7.85901	10.99965	14.13873
3	0.5	0.05	1.59644	4.68675	7.87963	10.96993	14.16281

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА

Рассмотрим обратную задачу, когда по конечному числу собственных частот необходимо найти начало надреза, расположенного не в середине стержня.

Пусть известны собственные значения $\lambda_1 = 1.57952$, $\lambda_2 = 4.71238$, $\lambda_3 = 7.84524$, длина стержня $L = 1$, ширина и высота $H = 0.1$, $B = 0.1$, ширина и глубина надреза $b = 0.01$, $h = 0.01$ соответственно. Необходимо найти точку начала надреза x_c .

Подставив отношение площадей (5) и известные значения в частотное уравнение (14), получим

$$D = -\lambda_n \sin \lambda_n \cos \lambda_n x_c \sin \lambda_n x_c P + \cos \lambda_n \sin^2 \lambda_n x_c + \sin \lambda_n \cos \lambda_n x_c \sin \lambda_n x_c + \cos^2 \lambda_n x_c \cos \lambda_n = 0. \quad (15)$$

Уравнение (15) дает два действительных решения (рис. 5), симметричных относительно середины отрезка L :

$$x_{c1} = 0.25, x_{c2} = 0.75.$$

¹ <https://www.maplesoft.com/>. Дата обращения: 12.01.2023. / Accessed January 01, 2023.

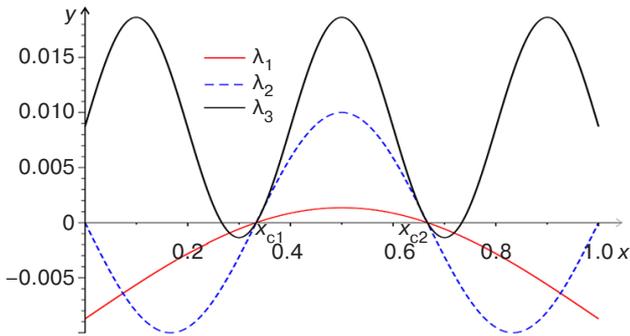


Рис. 5. Решение обратной задачи

Из решения обратной задачи следует, что идентификация стержня только с помощью продольных колебаний не дает однозначного решения. Для получения точного решения необходимо добавить дополнительные условия. Например, поменять краевое условие на одном из его концов.

Добавим упругий элемент на правый конец стержня. Соответственно, появится условие Робена.

Граничные условия (условия Робена) для стержня единичной длины ($L = 1$) имеют вид:

$$y'_x(1) - Ky(1) = 0, \quad (16)$$

где K – жесткость пружины на конце.

Поставив общее решение (8) в (16), получим

$$M = \begin{vmatrix} 0 & K \cos \lambda_n - \lambda_n \sin \lambda_n & \cos \lambda_n + \frac{\sin \lambda_n}{\lambda_n} K \\ \frac{\sin \lambda_n x_c}{\lambda_n} & -\cos \lambda_n x_c & -\frac{\sin \lambda_n x_c}{\lambda_n} \\ \cos \lambda_n x_c & P \lambda_n \sin \lambda_n x_c & -P \cos \lambda_n x_c \end{vmatrix} = 0.$$

Находим определитель

$$D = \frac{1}{\lambda_n} (K \cos \lambda_n \cos(\lambda_n x_c) \sin(\lambda_n x_c) P + K \sin \lambda_n \sin(\lambda_n x_c)^2 P + \cos \lambda_n \sin(\lambda_n x_c)^2 P \lambda_n - \sin \lambda_n \cos(\lambda_n x_c) \sin(\lambda_n x_c) P \lambda_n - K \cos(\lambda_n x_c) \sin(\lambda_n x_c) + K \sin(\lambda_n) \cos(\lambda_n x_c)^2 + \lambda_n \cos(\lambda_n x_c)^2 \cos \lambda_n + \sin(\lambda_n) \cos(\lambda_n x_c) \sin(\lambda_n x_c) \lambda_n) = 0. \quad (17)$$

Решение (17) дает собственные значения λ_n .

Решим обратную задачу и построим графические решения уравнения.

Пусть известны первые три собственные частоты $\lambda_1 = 2.2972263$, $\lambda_2 = 5.0846367$, $\lambda_3 = 8.0885773$, отношение площадей поперечного сечения $P = 0.98$ и коэффициент жесткости пружины $K = 2$. Необходимо найти место надреза x_c . Подставим по порядку собственные частоты продольных колебаний в (17). Решение уравнения представлено на рис. 6.

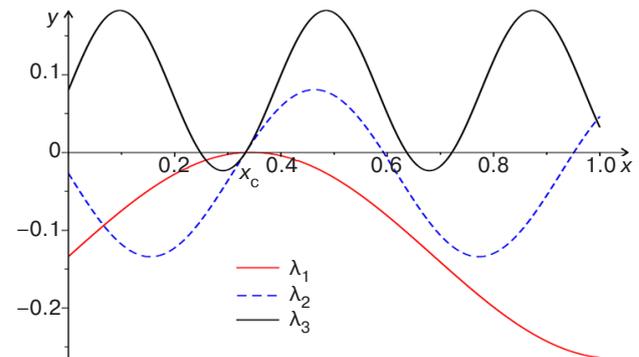


Рис. 6. Решение задачи с упругим закреплением

Из рис. 6 видно, что при условии упругого закрепления задача имеет точное решение в точке $x_c = 0.25$. Из этого следует, что для однозначного решения обратной задачи требуется применить упругое закрепление на одном из концов стержня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С граничными условиями (7) решение обратной задачи идентификации продольного надреза по собственным частотам продольных колебаний неустойчиво, т.к. собственные формы близки друг к другу в точках, симметричных от середины надреза, и, чтобы решить задачу однозначно, необходимо заменить условие закрепления одного из концов стержня на упругое. Построенные графики и приведенные таблицы решения прямой задачи показали зависимость собственных частот от начальных данных. Приведен пример решения обратной задачи, из которого видно, что для однозначного определения начала надреза достаточно двух собственных частот, полученных для различных граничных условий. Данный метод возможно применять при решении задач по идентификации геометрических параметров деталей, смоделированных стержнем.

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Шакирзянов Р.А., Шакирзянов Ф.Р. *Динамика и устойчивость сооружений*: учебное пособие. М.: Ай Пи Ар Медиа; 2022. 119 с. ISBN 978-5-4497-1379-7
2. Ахтямов А.М., Ильгамов М.А. Модель изгиба балки с надрезом: прямая и обратная задачи. *Прикладная механика и техническая физика*. 2013;54(1):152–162.
3. Rice J.R., Levy N. The part through surface crack in an elastic plate. *J. Appl. Mech.* 1972;39(1):185–194. <https://doi.org/10.1115/1.3422609>
4. Freund L.B., Herrmann G. Dynamic fracture of a beam or plate in plane bending. *J. Appl. Mech.* 1976;43(1):112–116. <https://doi.org/10.1115/1.3423760>
5. Narkis Y. Identification of crack location in vibrating simply-supported beams. *J. Sound Vib.* 1994;172(4):549–558. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1994.1195>
6. Ватульян А.О., Осипов А.В. Поперечные колебания балки с локализованными неоднородностями. *Вестник Донского государственного технического университета*. 2012;12(8):34–40.
7. Ильгамов М.А., Хакимов А.Г. Диагностика повреждений консольной балки с надрезом. *Дефектоскопия*. 2009;6:83–89.
8. Ильгамов М.А. Продольные колебания стержня с зарождающимися поперечными трещинами. *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. 2017;1:23–31.
9. Утяшев И.М. Продольные колебания стержня с переменным сечением. *Многофазные системы*. 2019;14(2):138–141. <https://doi.org/10.21662/mfs2019.2.019>
10. Акуленко Л.Д., Байдулов В.Г., Георгиевский Д.В., Нестеров С.В. Эволюция собственных частот продольных колебаний стержня при увеличении дефекта поперечного сечения. *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. 2017;6:136–144.
11. Болотин В.В. (ред.). *Вибрации в технике*: справочник в 6 т. Т. 1. *Колебания линейных систем*. М.: Машиностроение; 1978. 352 с.
12. Narkis Y. Identification of crack location in vibrating simply-supported beams. *J. Sound Vib.* 1994;172(2):549–558. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1994.1195>
13. Ахтямов А.М., Фатхелисламов А.Ф. Идентификация местоположения надреза стержня по собственной частоте. *Доклады Башкирского университета*. 2017;2(2):204–208.
14. Акуленко Л.Д., Гавриков А.А., Нестеров С.В. Идентификация дефектов поперечного сечения стержня по собственным частотам и особенностям формы продольных колебаний. *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. 2019;6:98–107. <https://doi.org/10.1134/S0572329919060023>
15. Попов А.Л., Садовский С.А. О соответствии теоретических моделей продольных колебаний стержня экспериментальным данным. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. 2021;8(2):270–281. <https://doi.org/10.21638/spbu01.2021.207>
1. Shakirzyanov R.A., Shakirzyanov F.R. *Dinamika i ustoychivost' sooruzhenii*: uchebnoe posobie (*Dynamics and stability of structures: textbook*). Moscow: IPR Media; 2022. 119 p. (in Russ.). ISBN 978-5-4497-1379-7
2. Akhtyamov A.M., Il'gamov M.A. Flexural model for a notched beam: Direct and inverse problems. *J. Appl. Mech. Tech. Phy.* 2013;54(1):132–141. <https://doi.org/10.1134/S0021894413010161>
[Original Russian Text: Akhtyamov A.M., Il'gamov M.A. Flexural model for a notched beam: Direct and inverse problems. *Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika*. 2013;54(1):132–141 (in Russ.).]
3. Rice J.R., Levy N. The part through surface crack in an elastic plate. *J. Appl. Mech.* 1972;39(1):185–194. <https://doi.org/10.1115/1.3422609>
4. Freund L.B., Herrmann G. Dynamic fracture of a beam or plate in plane bending. *J. Appl. Mech.* 1976;43(1):112–116. <https://doi.org/10.1115/1.3423760>
5. Narkis Y. Identification of crack location in vibrating simply-supported beams. *J. Sound Vib.* 1994;172(4):549–558. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1994.1195>
6. Vatul'yan A.O., Osipov A.V. Transverse vibrations of beam with localized heterogeneities. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University (Advanced Engineering Research)*. 2012;12(8):34–40 (in Russ.).
7. Il'gamov M.A., Khakimov A.G. Diagnosis of damage of a cantilever beam with a notch. *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2009;45(6):430–435. <https://doi.org/10.1134/S1061830909060072>
[Original Russian Text: Ilgamov M.A., Khakimov A.G. Diagnosis of damage of a cantilever beam with a notch. *Defektoskopiya*. 2009;45(6):83–89 (in Russ.).]
8. Il'gamov M.A. Longitudinal vibrations of a bar with incipient transverse cracks. *Mech. Solids*. 2017;52(1):18–24. <https://doi.org/10.3103/S0025654417010034>
[Original Russian Text: Il'gamov M.A. Longitudinal vibrations of a bar with incipient transverse cracks. *Izvestiya Akademii Nauk. Mekhanika Tverdogo Tela*. 2017;1:23–31 (in Russ.).]
9. Utyashev I.M. Longitudinal oscillation of a rod with a variable cross section *Mnogofaznye sistemy = Multiphase Systems*. 2019;14(2):138–141 (in Russ.). <https://doi.org/10.21662/mfs2019.2.019>
10. Akulenko L.D., Baidulov V.G., Georgievskii D.V., Nesterov S.V. Evolution of natural frequencies of longitudinal vibrations of a bar as its cross-section defect increases. *Mech. Solids*. 2017;52(6):708–714. <https://doi.org/10.3103/S0025654417060103>
[Original Russian Text: Akulenko L.D., Baidulov V.G., Georgievskii D.V., Nesterov S.V. Evolution of natural frequencies of longitudinal vibrations of a bar as its cross-section defect increases. *Izvestiya Akademii Nauk. Mekhanika Tverdogo Tela*. 2017;6:136–144 (in Russ.).]
11. Bolotin V.V. (Ed.). *Vibratsii v tekhnike*: Spravochnik v 6 t. T. 1. *Kolebaniya lineinykh system (Vibrations in Technology: in 6 v. V. 1. Oscillations of Linear Systems)*. Moscow: Mashinostroenie; 1978. 352 p. (in Russ.).

12. Narkis Y. Identification of crack location in vibrating simply-supported beames. *J. Sound Vib.* 1994;172(2): 549–558. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1994.1195>
13. Akhtyamov A.M., Fatkhelislamov A.F. Identification of location of a cut of the rod on natural frequency. *Doklady Bashkirskogo Universiteta* 2017;2(2):204–208 (in Russ.)
14. Akulenko L.D., Gavrikov A.A., Nesterov S.V. Identification of cross-section defects of the rod by using eigenfrequencies and features of the shape of longitudinal oscillations. *Mech. Solids.* 2019;54(8): 1208–1215. <https://doi.org/10.3103/S0025654419080119> [Original Russian Text: Akulenko L.D., Gavrikov A.A., Nesterov S.V. Identification of cross-section defects of the rod by using eigenfrequencies and features of the shape of longitudinal oscillations. *Izvestiya Akademii Nauk. Mekhanika Tverdogo Tela.* 2019;6:98–107 (in Russ.)]
15. Popov A.L., Sadovsky S.A. Correspondence of theoretical models of longitudinal rod vibrations to experimental data. *Vestnik St. Peterb. Univ. Math.* 2021;54(2):162–170. <https://doi.org/10.1134/S1063454121020114> [Popov A.L., Sadovsky S.A. Correspondence of theoretical models of longitudinal rod vibrations to experimental data. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Astronomiya.* 2021;54(2):270–281 (in Russ.). <https://doi.org/10.21638/spbu01.2021.207>]

Об авторах

Утяшев Ильнур Мирзович, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (450054, Россия, Республика Башкортостан, Уфа, пр. Октября, д. 71); доцент кафедры математики, Башкирский государственный аграрный университет (450001, Россия, Республика Башкортостан, Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34). E-mail: utyashevim@mail.ru. Scopus Author ID 56966700200, ResearcherID J-1064-2018, SPIN-код РИНЦ 7856-5351, <https://orcid.org/0000-0002-2342-0492>

Фатхелисламов Альфир Фирдависович, старший преподаватель кафедры управления информационной безопасностью, Уфимский университет науки и технологий (450076, Россия, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32). E-mail: alfir93@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 5470-4819

About the authors

Inur M. Utyashev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher, Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa Federal Research Center, Russian Academy of Sciences (71, Oktyabrya pr., Ufa, Republic of Bashkortostan, 450054 Russia); Assistant Professor, Department of Mathematics, Bashkir State Agrarian University (34, 50-Letiya Oktyabrya ul., Ufa, Republic of Bashkortostan, 450001 Russia). E-mail: utyashevim@mail.ru. Scopus Author ID 56966700200, ResearcherID J-1064-2018, RSCI SPIN-code 7856-5351, <https://orcid.org/0000-0002-2342-0492>

Alfir F. Fatkhelislamov, Senior Lecturer, Department of Information Security Management, Ufa University of Science and Technology (32, Zaki Validi ul., Ufa, Republic of Bashkortostan, 450076 Russia). E-mail: alfir93@mail.ru. RSCI SPIN-code 5470-4819

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический университет».
119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.
Подписано в печать 31.03.2023 г.
Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.
Уч.-изд. листов 12.5.
Тираж 100 экз. Заказ № 133.

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 March 31, 2023.
Format 60 × 90/8. Digital print.
C.p.l. 12.5.
100 copies. Order No. 133.

Subscription to the *Russian Technological Journal* printed version can be made through
the *Kniga-Servis* Agency, www.akc.ru.
Subscription index: **79641**.

