



DOI: 10.32603/1993-8985

ISSN 1993-8985 (print)
ISSN 2658-4794 (online)

Известия высших учебных заведений России

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Том 25 № 1 2022



Journal of the Russian Universities

RADIOELECTRONICS

Vol. 25 No. 1 2022

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

2022

Saint Petersburg
ETU Publishing house

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (ПИ № ФС77-74297 от 09.11.2018 г.).

Индекс по каталогу АО «Почта России» П4296

Учредитель и издатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») Журнал основан в 1998 г.

Издается 6 раз в год.

Включен в RSCI на платформе Web of Science, Ulrichsweb Global Serials Director, Bielefeld Academic Search Engine,

Google Scholar, Library of Congress, Research4life, ResearchBib, WorldCat, The Lens, OpenAIRE.

Индексируется и архивируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ); соответствует декларации Budapest Open Access Initiative, является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ), Crossref.

Редакция журнала:

197022, Санкт-Петербург,

ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: 8 (812) 234-10-13,

e-mail: radioelectronic@yandex.ru

RE.ELTECH.RU

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», оформление, 2020

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

А. В. СОЛОМОНОВ, д.ф.-м.н., проф., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

им. В. И. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

В. М. КУТУЗОВ, д.т.н., президент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Dieter H. BIMBERG, PhD, Dr Phil. Nat. Dr H. C. Mult., исполн. директор "Bimberg Center of Green Photonics", Чанчуньский институт оптики, точной механики и физики КАН, Чанчунь, Китай

Anna DZVONKOVSKAYA, Cand. of Sci. (Phys.-Math.), R & D-разработчик, HELZEL Messtechnik, Кальтенкирхен, Германия

Matthias A. HEIN, PhD, Dr Rer. Nat. Habil., Prof., Технический университет, Ильменау, Германия

Jochen HORSTMANN, PhD, Dr Rer. Nat., директор департамента, Гельмгольц-центр, Гестахт, Германия

Alexei KANAREYKIN, Dr Sci., гл. исполн. директор, Euclid TechLabs LLC, Солон, США

Erkki LANDEKANTA, PhD, Prof., Технический университет, Лаппеенранта, Финляндия

Ferran MARTIN, PhD (Phys.), Prof., Автономный университет, Барселона, Испания

Piotr SAMCZYNSKI, PhD, Dr Sci., Associate Prof., Варшавский технологический университет,

Институт электронных систем, Варшава, Польша

Thomas SEEGER, Dr Sci. (Eng.), Prof., Университет Зигена, Зиген, Германия

А. Г. ВОСТРЕЦОВ, д.т.н., проф., Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

С. Т. КНЯЗЕВ, д.т.н., доц., Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

А. Н. ЛЕУХИН, д.ф.-м.н., проф., Марийский государственный технический университет, Йошкар-Ола, Россия

С. Б. МАКАРОВ, д.ф.-м.н., проф., Санкт-Петербургский государственный политехнический университет им. Петра Великого, С.-Петербург, Россия

Л. А. МЕЛЬНИКОВ, д.ф.-м.н., проф., Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

А. А. МОНАКОВ, д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), С.-Петербург, Россия

А. А. ПОТАПОВ, д.ф.-м.н., гл.н.с., Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

Н. М. РЫСКИН, д.ф.-м.н., гл.н.с., Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов, Россия

С. В. СЕЛИЩЕВ, д.ф.-м.н., проф., НИУ Московский институт электронной техники, Москва, Россия

А. Л. ТОЛСТИХИНА, д.ф.-м.н., гл.н.с., Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН, Москва, Россия

А. Б. УСТИНОВ, д.ф.-м.н., проф., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия

В. М. УСТИНОВ, д.ф.-м.н., чл.-кор. РАН, директор, Центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, С.-Петербург, Россия

В. А. ЦАРЕВ, д.т.н., проф., Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

Ю. В. ЮХАНОВ, д.т.н., проф., Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

С. Е. ГАВРИЛОВ, к.т.н., доц., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия

Цель журнала – освещение актуальных проблем, результатов прикладных и фундаментальных исследований, определяющих направление и развитие научных исследований в области радиоэлектроники

Журнал выполняет следующие задачи:

- предоставлять авторам возможность публиковать результаты своих исследований;
- расширять сферу профессионального диалога российских и зарубежных исследователей;
- способствовать становлению лидирующих мировых

позиций ученых России в области теории и практики радиоэлектроники;

- знакомить читателей с передовым мировым опытом внедрения научных разработок;
- привлекать перспективных молодых специалистов к научной работе в сфере радиоэлектроники;
- информировать читателей о проведении симпозиумов, конференций и семинаров в области радиоэлектроники



Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0



JOURNAL OF THE RUSSIAN UNIVERSITIES. RADIOELECTRONICS ***IZVESTIYA VYSSHIKH UCHEBNYKH ZAVEDENII ROSSII. RADIOELEKTRONIKA***

Registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (PI № FS77-74297 from 09.11.2018).
Subscription index in JSC "Post of Russia" catalogue is П4296
Founder and publisher: Saint Petersburg Electrotechnical University (ETU)
Founded in 1998. Issued 6 times a year.
The journal is included in RSCI (Web of Science platform), Ulrichsweb Global Serials Director, Bielefeld Academic Search Engine, Google Scholar, Library of Congress, Research4life, ResearchBib, WorldCat, The Lens, OpenAIRE.

The journal is indexed and archived in the Russian science citation index (RSCI).
The journal complies with the Budapest Open Access Initiative Declaration, is a member of the Directory of Open Access Journals (DOAJ) and Crossref.
Editorial address:
ETU, 5F Prof. Popov St., St Petersburg 197022, Russia
Tel.: +7 (812) 234-10-13
E-mail: radioelectronic@yandex.ru **RE.ELTECH.RU**
© ETU, design, 2020

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF

Alexander V. SOLOMONOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

CHAIRMAN OF THE EDITORIAL BOARD

Vladimir M. KUTUZOV, Dr Sci. (Eng.), President, Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

EDITORIAL BOARD:

Dieter H. BIMBERG, PhD, Dr Phil. Nat. Dr H. c. mult., Executive Director of the "Bimberg Center of Green Photonics", Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics CAS, Changchun, China

Anna DZVONKOVSKAYA, Cand. of Sci. (Phys.-Math.), R & D developer, HELZEL Messtechnik, Kaltenkirchen, Germany

Matthias A. HEIN, PhD, Dr. Rer. Nat. Habil., Professor, Technical University, Ilmenau, Germany

Jochen HORSTMANN, PhD, Dr. Rer. Nat., Head of the Department of Radar Hydrography, Institute for Coastal Research, Helmholtz Zentrum Geesthacht, Geesthacht, Germany

Alexei KANAREYKIN, Dr Sci. (Phys.-Math.), President/CEO of Euclid TechLabs LLC, Solom, USA

Sergey T. KNYAZEV, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Erkki LAHDERANTA, PhD, Professor, Technical University, Lappeenranta, Finland

Anatolii N. LEUKHIN, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Mari State University, Yoshkar-Ola, Russia

Sergey B. MAKAROV, Dr Sci. (Eng.), Professor, Institute of Physics, Nanotechnology and Telecommunication St Petersburg Polytechnic University, St Petersburg, Russia

Ferran MARTIN, PhD (Phys.), Professor, Autonomous University, Barcelona, Spain

Leonid A. MELNIKOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

Andrei A. MONAKOV, Dr Sci. (Eng.), Professor, State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia

Alexander A. POTAPOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of RAS, Moscow, Russia

Nikita M. RYSKIN, Dr Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Saratov Branch, Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Saratov, Russia

Piotr SAMCZYNSKI, PhD, Dr Sci., Associate Professor, Warsaw University of Technology, Institute of Electronic Systems, Warsaw, Poland

Thomas SEEGER, Dr Sci. (Eng.), Professor, University of Siegen, Siegen, Germany

Sergey V. SELISHCHEV, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia

Alla L. TOLSTIKHINA, Dr Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Divisional Manager, Institute of Crystallography named after A. Shubnikov RAS, Moscow, Russia

Vladislav A. TSAREV, Dr Sci. (Eng.), Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, Russia

Aleksey B. USTINOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

Victor M. USTINOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Correspondent Member of RAS, director, Submicron Heterostructures for Microelectronics, Research & Engineering Center, RAS, St Petersburg, Russia

Aleksey G. VOSTRETISOV, Dr Sci. (Eng.), Professor, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Yu V. YUKHANOV, Dr Sci. (Eng.), Professor, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

EXECUTIVE SECRETARY

Stanislav E. GAVRILOV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

The journal is aimed at the publication of actual applied and fundamental research achievements in the field of radioelectronics.

Key Objectives:

- provide researchers in the field of radioelectronics with the opportunity to promote their research results;
- expand the scope of professional dialogue between Russian and foreign researchers;
- promote the theoretical and practical achievements of Russian scientists in the field of radioelectronics at the international level;

- acquaint readers with international best practices in the implementation of scientific results;
- attract promising young specialists to scientific work in the field of radioelectronics;
- inform readers about symposia, conferences and seminars in the field of Radioelectronics



All the materials of the journal are available under a Creative Commons Attribution 4.0 License

СОДЕРЖАНИЕ

Оригинальные статьи

Радиолокация и радионавигация

Нгуен Ван Куан. Мониторинг судоходства в прибрежных морских районах полуактивной радиолокационной системы с использованием сигналов подсвета спутникового базирования.....6

Штарев Д. В., Маврычев Е. А. Пространственное линейное кодирование сигналов в совместной системе радиолокации и многоадресной радиосвязи.....17

Владимиров В. В. Увеличение разрешающей способности по азимуту путем экстраполяции функции раскрыва антенной решетки оцениванием линейного предсказания по методу наименьших квадратов с использованием коэффициентов авторегрессионной модели.....28

Купряшкин И. Ф. Влияние разрешающей способности радиолокационных изображений военной техники на точность их классификации глубокой сверточной нейронной сетью.....36

Микро- и нанoeлектроника

Леньшин А. С., Мараева Е. В. Особенности применения сорбционного анализа для исследования различных наноматериалов электроники в зависимости от состава и технологических условий получения.....47

Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий

Смирнова Л. М., Фогт Е. В., Синегуб А. В., Солиман Х. Матричная модель для создания логических фильтров электронного каталога протезных модулей при персонифицированном синтезе протеза.....54

Пщелко Н. С., Царёва О. С. Расчет значений рабочих напряжений для безотказной работы электростатического измерителя направления малых отклонений.....64

От редакции

Правила для авторов статей.....75

Объявление.....80

CONTENTS

Original articles

Radar and Navigation

- Nguyen Van Quan.** Coastal Shipping Radar Monitoring System with Satellites as Transmitters of Opportunity.....6
- Shtarev D. V., Mavrychev E. A.** Spatial Linear Coding in Joint Radar and Multicast Communication Systems.....17
- Vladimirov V. V.** Increased Azimuth Resolution by Extrapolating the Antenna Array Aperture Function by Least Squares Linear Prediction Estimation Using Autoregressive Model Coefficients.....28
- Kupryashkin I. F.** Impact of the Radar Image Resolution of Military Objects on the Accuracy of their Classification by a Deep Convolutional Neural Network.....36

Micro- and Nanoelectronics

- Lenshin A. S., Maraeva E. V.** Application of Sorption Analysis in the Study of Various Nanomaterials Used in Electronics Depending on their Composition and Production Conditions.....47

Medical Devices, Environment, Substances, Material and Product

- Smirnova L. M., Fogt E. V., Sinegub A. V., Solieman H.** A Matrix Model for Creating Logical Filters of an Electronic Catalog of Prosthetic Modules for Customized Prostheses.....54
- Pshchelko N. S., Tsareva O. S.** Calculation of Voltages Ensuring Trouble-Free Operation of an Electrostatic Meter of the Direction of Small Angle Tilts.....64

From the Editor

- Author's Guide**.....75
- Announcement**.....80

Радиолокация и радионавигация

УДК 621.391

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-1-6-16>

Мониторинг судоходства в прибрежных морских районах полуактивной радиолокационной системы с использованием сигналов подсвета спутникового базирования

Нгуен Ван Куан ✉

Государственный технический университет им. Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам

✉ quanvnath@gmail.com

Аннотация

Введение. С развитием технологии и науки система полуактивной радиолокации, работающая на основе сторонних передатчиков источников сигналов подсвета, стала более интересной для радиолокационного сообщества. Использование спутниковых систем в качестве источников подсвета полуактивной радиолокационной станции дает возможность мониторинга прибрежных морских районов, где отсутствуют наземные источники сигналов подсвета. Сигналы спутниковых систем охватывают любую точку земной поверхности. Данная радиолокационная система дает возможность определения местонахождения судов и также контроля судоходства и в дальнейшем развитии может дополнить систему управления движением судов.

Цель работы. Создание макета полуактивной радиолокационной системы с использованием спутниковых систем в качестве сторонних источников сигнала подсвета и проведение экспериментального исследования системы мониторинга судов в прибрежных акваториях.

Материалы и методы. Используются антенны спутниковых сигналов AA2-KKC и инструменты записи радиосигналов на основе универсальной платы USRP B210, разработанная программа в прикладной среде MATLAB для обработки сигналов.

Результаты. Предложен алгоритм обработки спутникового сигнала глобальной навигационной системы GPS в полуактивной радиолокационной системе. Создан экспериментальный макет приемной станции полуактивной радиолокационной системы мониторинга судоходства в прибрежных морских акваториях на основе устройства ввода данных универсальной платы USRP серии B210. Получены результаты экспериментальных исследований макета приемной станции полуактивной радиолокации при использовании спутникового сигнала GPS L1 C/A-кода мониторинга судов в прибрежных акваториях.

Заключение. Результаты экспериментальных исследований на созданном макете полуактивной радиолокационной системы с использованием сторонних передатчиков сигналов подсвета спутникового базирования GPS показали возможность ее использования для мониторинга судоходства в речных и прибрежных морских акваториях. В дальнейшем предполагается многопозиционная модификация такой системы мониторинга, которая позволит обеспечить лучшее качество обнаружения и повышенную точность определения местоположения цели.

Ключевые слова: спутниковый сигнал, полуактивная радиолокация, система мониторинга, многопозиционная полуактивная радиолокационная система, ГНСС, GPS

Для цитирования: Нгуен Ван Куан. Мониторинг судоходства в прибрежных морских районах полуактивной радиолокационной системы с использованием сигналов подсвета спутникового базирования // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 1. С. 6–16. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-6-16

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 22.11.2021; принята к публикации после рецензирования 22.12.2021; опубликована онлайн 28.02.2022



Coastal Shipping Radar Monitoring System with Satellites as Transmitters of Opportunity

Nguyen Van Quan✉

Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

✉ quanvnhath@gmail.com

Abstract

Introduction. With the development of technology and science, passive radar systems operating on the basis of third-party transmitters of illumination signal sources are increasingly attracting research interest. The use of satellite systems as transmitters of opportunity for a radar station makes it possible to monitor coastal sea areas, where the ground sources of illumination signals are absent. Satellite systems can cover any point on the Earth's surface. Passive radar systems can be used to determine the location of ships and monitor navigation. They are also promising as part of vessel traffic control systems.

Aim. To develop a model of a passive radar system that uses satellite systems as third-party sources of illumination signals and to conduct an experimental study of a system for monitoring ships in coastal waters.

Materials and methods. The AA2-KKC antennas of satellite signals and radio recording tools based on the universal USRP B210 board were used. Signal processing was performed using a program developed in the MATLAB environment.

Results. An algorithm for processing satellite signals of the GPS global navigation system in a passive radar system is proposed. An experimental model of the receiving station for such a radar monitoring system was created on the basis of a data input device for a universal USRP board of the B210 series. Experimental results for the receiving station using the satellite signal GPS L1 C/A-code for coastal monitoring were obtained.

Conclusion. The developed experimental model of a passive radar receiving station using third-party transmitters of GPS satellite-based illumination signals on the L1 frequency range of the C/A-code type can be used for detecting ships and monitoring coastal navigation. Future research will consider a multi-position modification of such a monitoring system for improving its detection quality and increasing its target positioning accuracy.

Keywords: satellite signal, monitoring radar, coastal navigation, multistatic radar system, GNSS, GPS

For citation: Nguyen Van Quan. Coastal Shipping Radar Monitoring System with Satellites as Transmitters of Opportunity. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 1, pp. 6–16. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-6-16

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

Submitted 22.11.2021; accepted 22.12.2021; published online 28.01.2022

Введение. С каждым годом в мире увеличивается количество судов, выполняющих грузовые и пассажирские перевозки, а также туристических и рыболовных судов со средним и малым водоизмещением. В связи с этим все острее становится проблема контроля и обеспечения безопасности судоходства в речных и морских акваториях. Следует отметить и особую угрозу использования судов в противоправных действиях: контрабандных перевозках, диверсиях. Основным инструментом наблюдения за судоходством является использование автоматической идентификационной системы (АИС), которой оснащено

большинство судов, но данная система может быть отключена на борту. Кроме этой системы также используются радиолокационные средства для наблюдения за морской обстановкой. С развитием технологий и науки в настоящее время в радиолокации нередко используются сигналы подсвета сторонних источников из-за ряда преимуществ: низкая стоимость изготовления и эксплуатации, отсутствие помех другим радиотехническим устройствам, экологичность [1, 2].

Применение полуактивной радиолокационной системы (ПА РЛС) с использованием сторонних источников сигнала подсвета для мони-

торинга судоходства в прибрежных акваториях играет значительную роль в обеспечении безопасности и контроля морской обстановки. В [3–6] было предложено использовать сигналы систем спутникового базирования в качестве источников подсвета в ПА РЛС. Существуют различные спутниковые системы: связи (Iridium, Inmarsat), глобальные навигационные (GPS, GLONASS, GALILEO, BEUDOI), телевидения (DVB-S(2)). В любое время суток в одной точке земной поверхности постоянно можно наблюдать порядка 6–8 спутников глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) [7]. ГНСС дает возможность непрерывной работы полуактивной радиолокационной станции независимо от погодных условий, имеет широкую зону покрытия и доступный диапазон частот сигналов для гражданского использования. Поэтому целесообразно использовать сигналы спутникового базирования в ПА РЛС для мониторинга речных и прибрежных морских районов, где отсутствуют наземные источники подсвета.

В статье описывается разработка макета ПА РЛС мониторинга движения судов в речных и прибрежных морских акваториях с использованием сигналов спутникового базирования GPS в качестве источников подсвета. В статье рассмотрен алгоритм обработки сигналов подсвета L1 C/A-кода GPS в системе бистатической полуактивной радиолокации и представлены результаты экспериментального исследования системы мониторинга судов в прибрежных морских районах.

На рис. 1 представлена общая структурная схема системы бистатической полуактивной ра-

диолокации мониторинга речных и прибрежных морских акваторий при использовании сторонних сигналов ГНСС в качестве источников подсвета. Спутники ГНСС GPS работают на частотах L-диапазона, содержат три модулированные несущие частоты, обозначаемые L1, L2 и L5. В данной статье в качестве передатчиков используется система навигации GPS с сигналом подсвета с центральной частотой $L1 = 1575.42$ МГц, который состоит из двух поднесущих компонентов с квадратурной фазовой манипуляцией, при этом несущая сигнала C/A-кода (Coarse/Acquisition code) отстаёт от сигнала P-кода (Encrypted Precision code) на 90° [8]. Сигналы могут быть записаны в следующем виде:

$$s_i(t) = \sqrt{2P_i} C_{iC/A}(t) D_i(t) \cos(2\pi f t) + \sqrt{2P_i} C_{iP}(t) D_i(t) \sin(2\pi f t),$$

где $\sqrt{2P_i}$ – мощность компонентов сигнала i -го спутника; $C_{iC/A}(t)$ – открытый C/A-код i -го спутника; $D_i(t)$ – навигационное сообщение (NAV – Navigation) i -го спутника; f – несущая частота i -го спутника; $C_{iP}(t)$ – защищенный P-код i -го спутника.

Псевдослучайная последовательность (ПСП) C/A-кода представляет собой двухфазный модулированный сигнал с частотой дискретизации 1.023 МГц для гражданского использования. Формирование ПСП типа C/A происходит по схеме генерации, представленной на рис. 2 [9].

Каждый спутник глобальной навигационной системы GPS имеет свою ПСП C/A-кода, в соответствии с номером спутника. Одна из наиболее важных характеристик таких кодов – их корреляционные свойства. При помощи этой характеристики можно определять номер спутника и его ПСП на этапе обработки принятых в ПА РЛС сигналов.

Сигналы спутниковой системы навигации GPS имеют низкий уровень мощности на земной поверхности, при этом уровень отраженного от объекта наблюдения сигнала будет недостаточен для обнаружения. Для решения этой проблемы предлагается увеличить время накопления сигналов в ПА РЛС. Объектом наблюдения в ПА РЛС мониторинга речных и прибрежных морских акваторий является корабль, который имеет относительно невысокую скорость движения. Также при увеличении времени накопления в ПА РЛС улучшается разрешающая способность по доплеровской частоте

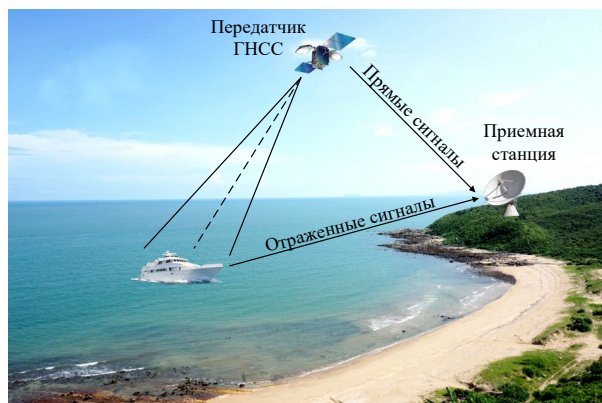


Рис. 1. Структура системы бистатической полуактивной радиолокации мониторинга на основе спутниковых сигналов подсвета

Fig. 1. General structural system of bistatic radar monitoring based on satellite signals illumination

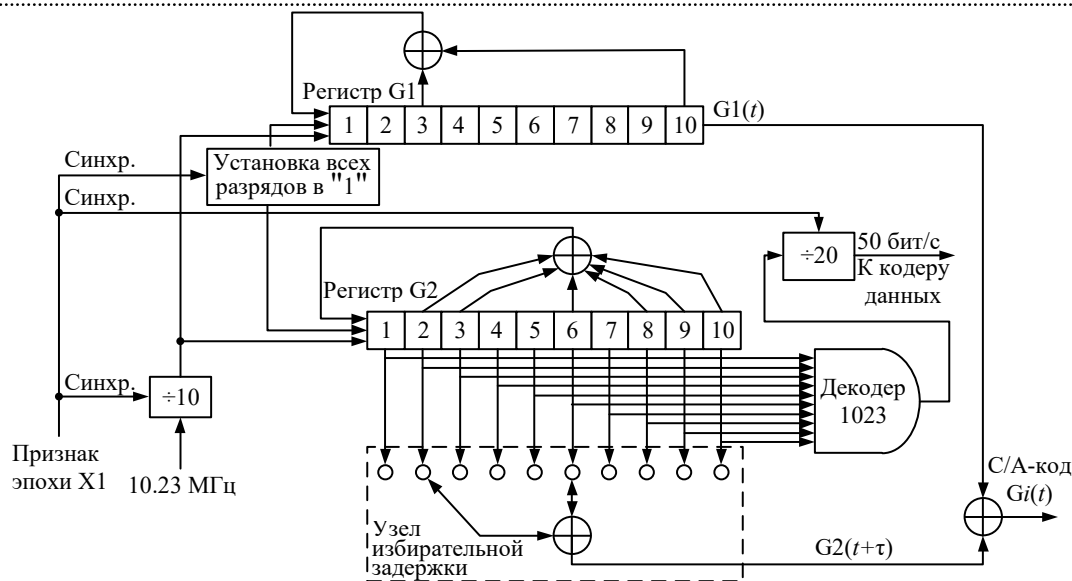


Рис. 2. Генерация С/А-кода

Fig. 2. C/A code generator

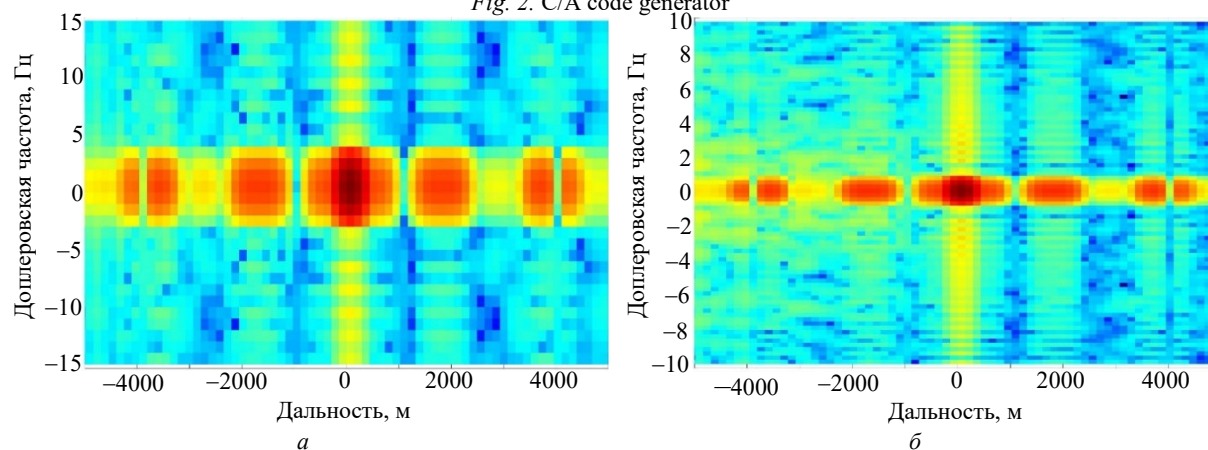


Рис. 3. Функция неопределенности спутниковых сигналов системы навигации GPS при времени накопления: а – 500 мс; б – 1 с

Fig. 3. Ambiguity function of satellite signals of the GPS navigation system under the coherence time of: а – 500 ms; б – 1 s

(рис. 3). Перед созданием экспериментального макета приемной станции ПА РЛС мониторинга на основе спутниковых сигналов подсвета были проведены записи спутниковых сигналов системы глобальной навигации GPS L1 C/A-кода с различным временем накопления с помощью имитатора сигналов ГНСС GSG-5 series в лаборатории НИИ "Прогноз" СПбГЭТУ "ЛЭТИ".

Для создания системы полуактивной радиолокации мониторинга судоходства в речных и прибрежных морских акваториях при использовании

спутниковых сигналов подсвета был разработан экспериментальный макет приемной станции (ПС) ПА РЛС. Структурная схема экспериментального макета ПС ПА РЛС представлена на рис. 4. Экспериментальный макет ПС ПА РЛС на основе сигналов подсвета спутниковой системы навигации GPS включает в себя: антенное устройство, устройство ввода данных и устройство записи, хранения и обработки данных.

В качестве антенного устройства ПС экспериментального макета ПА РЛС были использованы

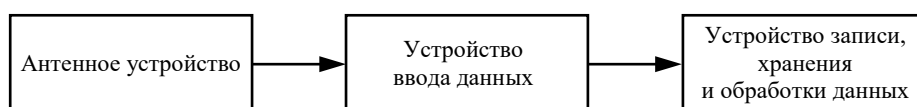


Рис. 4. Структурная схема экспериментального макета приемной станции ПА РЛС

Fig. 4. Block diagram of the experimental module of the receiving station of a bistatic radar system



Рис. 5. Антенный модуль AA2-KKC
Fig. 5. AA2-KKC antenna module

два антенных модуля AA2-KKC (рис. 5): одна антенна – в опорном канале, принимающая прямые сигналы от спутников GPS; вторая антенна – в канале наблюдения, принимающая отраженные сигналы от цели. Такие антенные модули работают в двух частотных диапазонах: $L1 = 1.571...1.614$ ГГц и $L2 = 1.237...1.256$ ГГц. Диаграмма направленности (ДН) антенного модуля AA2-KKC представлена на рис. 6 [10]. Для питания антенн используется переносной блок питания с выходным напряжением 5 В.

В качестве цифрового приемопередатчика и устройства ввода данных использована плата USRP (Universal Software Radio Peripheral) серии B210. Основной задачей платы USRP является преобразование аналоговых прямого и отраженного сигналов в цифровую форму. Основные параметры платы USRP серии B210 приведены в табл. 1 [11]. Запись и хранение сигналов во время эксперимента осуществляются при помощи переносного персонального компьютера (ноутбука), на который через порт USB 3.0 подаются оцифрованные сигналы прямого и отраженного каналов от платы USRP. Программа для подключения платы USRP к ноутбуку была написана в среде разработки MATLAB R2020b. Оцифрованный сигнал с выхода аналого-цифрового преобразователя (АЦП) платы USRP сохраняется на жесткий диск персонального компьютера.

Табл. 1. Основные параметры платы USRP B210

Tab. 1. Basic parameters of the USRP B210 board

Параметр	Значение
Число каналов	2
Частотный диапазон	От 70 МГц до 6 ГГц
Интерфейс с компьютером	USB 3.0
Мгновенная полоса пропускания в реальном времени, при использовании одновременно 2 каналов	30.72 МГц
Характеристики АЦП	12 бит, 61.44 МГц
Максимальный коэффициент усиления одного канала	78 дБ

Записанные сигналы в ПС ПА РЛС обрабатываются по разработанному алгоритму, представленному на рис. 7. Псевдослучайная последовательность C/A-кода формируется по принципу соответствующего генератора C/A-кода. Всего существует 35 типов ПСП C/A-кода, совпадающих с номерами спутников системы навигации GPS.

При движении по определенной орбите в силу ряда факторов скорости спутников различаются. Из-за этой причины при записи спутниковых сигналов с помощью платы USRP серии B210 возникает доплеровский сдвиг, что приводит к неправильным результатам при обработке сигналов. Поэтому, как отмечено ранее, на основе корреляционных характеристик с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) определяются номера спутников и их смещения по частоте (рис. 8) в опорном канале. С помощью генератора C/A-кода формируются все последовательности дальномерного кода спутников системы глобальной навигации GPS. После этого вычисляется посимвольная свертка прямого сигнала со сформированными последовательностями C/A-кода, чтобы определить, сигналы каких спутников приняты в опорном канале. На основе определенного номера

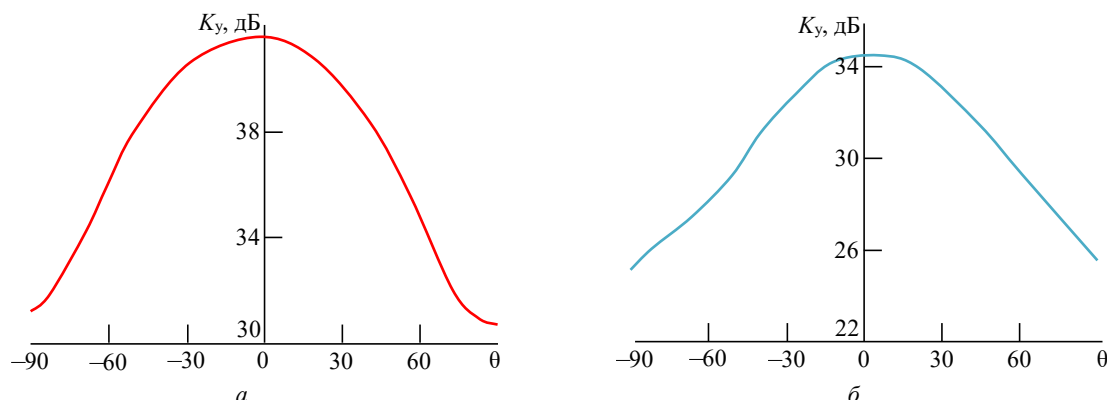


Рис. 6. Диаграмма направленности антенного модуля AA2-KKC: а – L1-диапазон частоты; б – L2-диапазон частоты

Fig. 6. Directional diagram of the antenna module AA2-KKC: а – L1-frequency range; б – L2-frequency range



Рис. 7. Блок-схема обработки ПА РЛС со спутниковым сигналом GPS C/A-кода

Fig. 7. Block diagram of the processing bistatic radar system with the satellite signal GPS C/A-code

спутника и его доплеровского сдвига формирует-ся опорный сигнал формата GPS L1 C/A-кода. На следующем этапе используем определенный

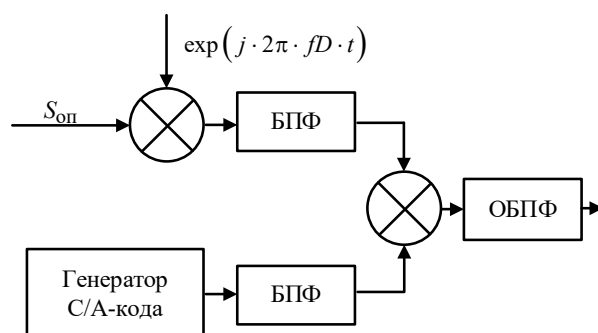


Рис. 8. Поиск номера и частоты смещения спутников системы навигации GPS

Fig. 8. Search for the number and offset frequency of satellites of the GPS navigation system

номер спутника GPS и вычитаем свертку по символам отраженного сигнала в канале наблюдения. Вычисляем взаимную корреляционную функцию между посимвольными свертками опорного и отраженного сигналов.

Экспериментальные исследования проводились в октябре 2021 года в Санкт-Петербурге (Россия). Приемная позиция была расположена в точке с координатами 59°53'17.9N – 30°10'10.6E на высоте 0.5 м над уровнем моря. Фотографии места расположения приемной позиции на Яндекс-карте и экспериментального макета приемной станции ПА РЛС в процессе исследований представлены на рис. 9, 10. Коэффициент усиления в плате USRP серии B210 на обоих каналах 70 дБ, время накопления сигналов 3 с. Объектом наблюдения был грузовой танкер "Oil/Chemical Tanker ONYX" с размерами: длина – 145.88 м и ширина – 22.53 м (рис. 11). Записанные файлы имеют объем более 40 Мб каждый.

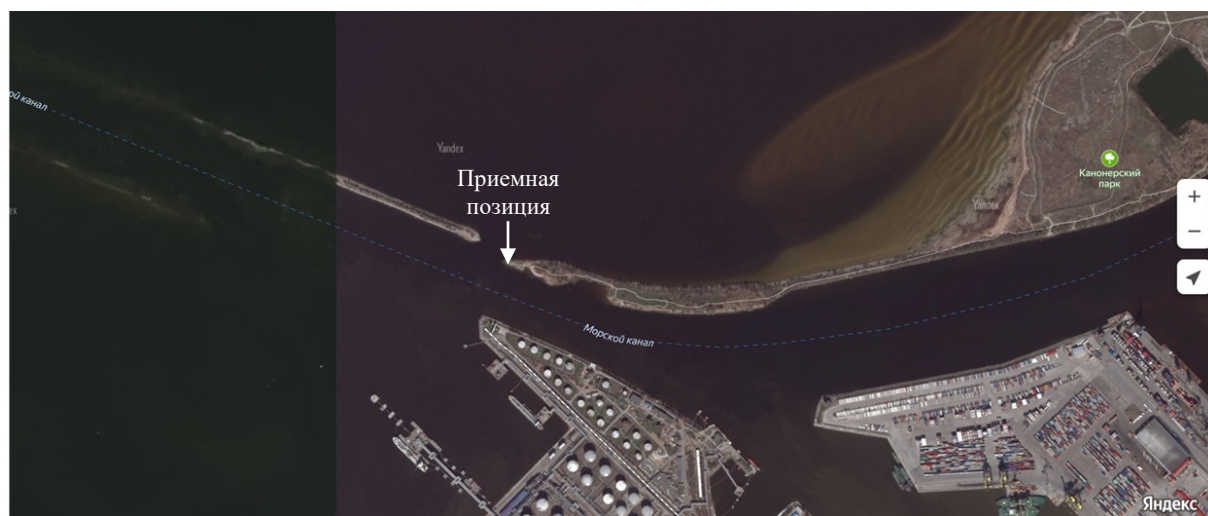


Рис. 9. Расположение приемной позиции экспериментального макета ПА РЛС мониторинга прибрежных морских акваторий на Яндекс-картах

Fig. 9. Yandex map position of the receiving station of the experimental bistatic radar system for monitoring coastal sea areas

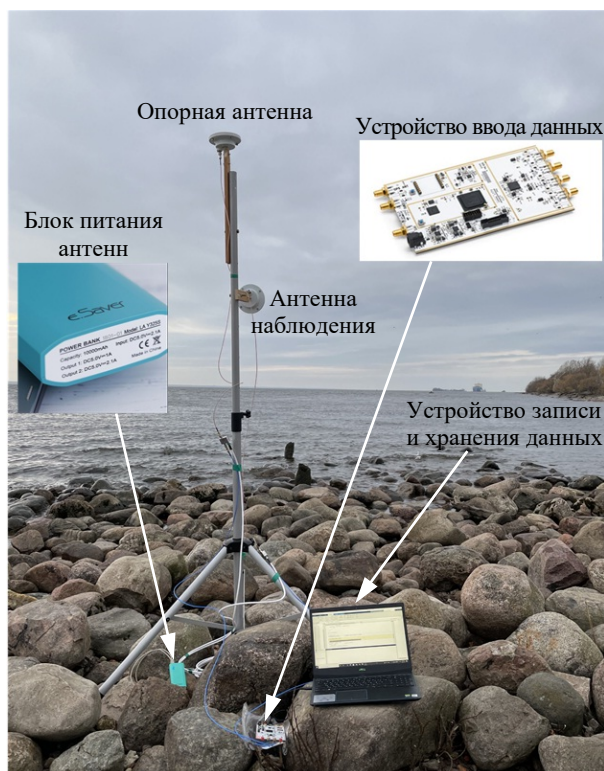


Рис. 10. Экспериментальный макет приемной станции ПА РЛС

Fig. 10. Experimental module of the receiving station of a bistatic radar system



Рис. 11. Макет ПА РЛС и цель в процессе исследования

Fig. 11. The module bistatic radar system under study and a target in the process of research



Рис. 12. Мониторинг спутников системы навигации в реальном времени

Fig. 12. Real-time monitoring of navigation satellites

Из результатов обработки полученных записей видно, что в опорном канале присутствуют сигналы от нескольких спутников (номера спутников 4, 5, 7, 9, 20, 30) (рис. 12). После поиска номера спутника и частоты сдвига в прямом канале было определено, что сигналы от спутников с номерами 7 и 30 имеют наибольший уровень мощности. С помощью генератора ПСП С/А-кода были сформированы опорные сигналы данных спутников. Оценим отношение сигнал/шум спутниковых сигналов на основе результатов корреляционной функции между формирующими последовательностями С/А-кода и прямым сигналом опорного канала. Результаты обнаружения корабля отображены на рис. 13, 14. На этапе вычисления взаимной функции неопределенности (ВФН) между опорным и отраженным сигналами получаем пики на нулевой доплеровской частоте. Это отметки от самого сигнала GPS и переотраженных сигналов неподвижных объектов, так как в канале наблюдения использовалась антенна с широкой ДН. Отметки от корабля оценим при сравнении результатов с использованием сигналов подсвета от разных спутников под номерами 7 и 30 и информации приложения АИС по параметрам движения корабля.

В табл. 2 показаны основные параметры объекта наблюдения, который был обнаружен ПА РЛС в процессе эксперимента. Параметры объекта незначительно различаются при

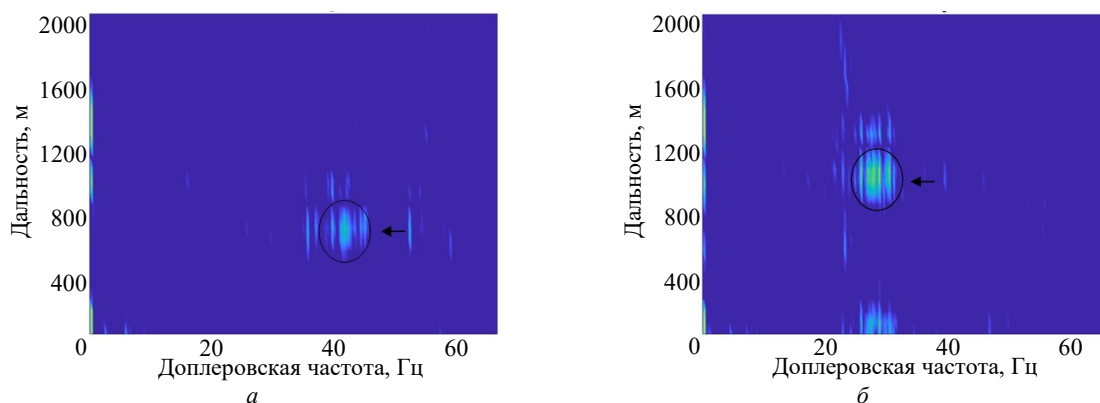


Рис. 13. Результат обнаружения корабля приемной станцией ПА РЛС при использовании сигнала подсвета спутника номер 7

Fig. 13. Results of detecting a ship by the receiving semi-active radar system using the illumination signal of satellite no. 7

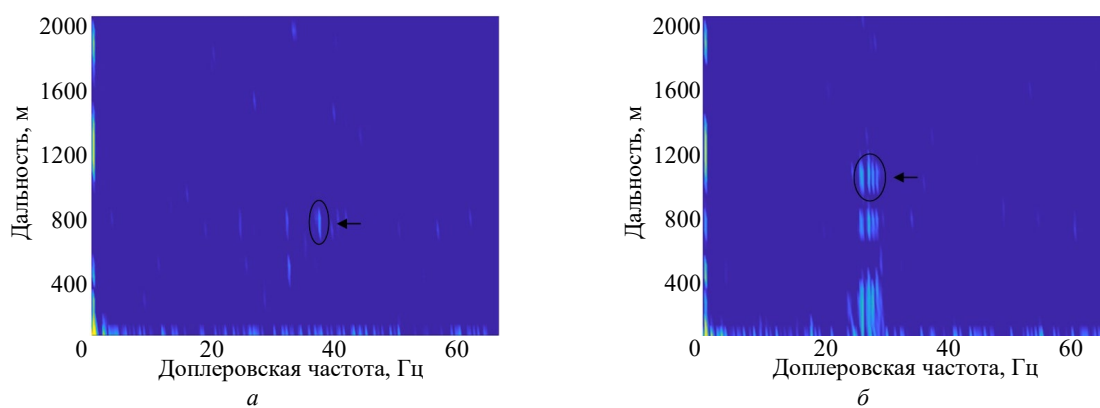


Рис. 14. Результат обнаружения корабля приемной станцией ПА РЛС при использовании сигнала подсвета спутника номер 30

Fig. 14. Results of detecting a ship by the receiving semi-active radar system using the illumination signal of satellite no. 30

Табл. 2. Параметры цели, обнаруженной с сигналом подсвета спутников GPS

Tab. 2. Target parameters detected with the signal illumination of GPS satellites

Номер спутника	Дальность, м	Частота Доплера, Гц	Скорость, м/с
7	733.1	41.67	3.96
	1099.7	28.3	2.69
30	733.1	37.33	3.55
	1099.7	27	2.57

использовании разных сигналов подсвета спутника, что связано с разной скоростью движения и местоположением спутников.

Обсуждение. Рассмотрена система бистатической полуактивной радиолокации с использованием сигналов подсвета спутникового базирования для мониторинга судов в прибрежных морских акваториях. Создан действующий экспериментальный макет приемной станции ПА РЛС на основе специализированной аналого-цифровой платы USRP серии B210. Проведены

экспериментальные исследования макета приемной станции ПА РЛС при использовании передатчиков источников сигналов подсвета спутникового базирования GPS диапазона частоты L1. Результаты экспериментальных исследований наглядно подтверждают, что возможно использовать сторонние передатчики источников сигналов подсвета спутникового базирования для создания ПА РЛС мониторинга судов в речных и прибрежных акваториях. Однако существует проблема низкого уровня мощности отраженного сигнала от цели и невысокой точности ее обнаружения.

Для решения этой проблемы предлагается вариант построения многопозиционной полуактивной радиолокационной системы (МП ПА РЛС) с использованием сигналов подсвета спутникового базирования, состоящей из одной приемной позиции и нескольких передающих [12]. Большинство традиционных МП ПА РЛС создано по принципу одного передатчика и нескольких

Табл. 3. Параметры спутников систем навигации GPS, GLONASS и GALILEO

Tab. 3. Parameters of a satellite of the GPS, GLONASS and GALILEO navigation system

Спутниковая система	Способ разделения сигналов	Несущие частоты, МГц	Общее число спутников	Количество доступных спутников в одной точке
GPS	Кодовый	L1 = 1575.42	32	Более 4
GLONASS	Кодово-частотный	L1 = 1600.995	24	
GALILEO	Кодовый	E5 = 1191.795	27	

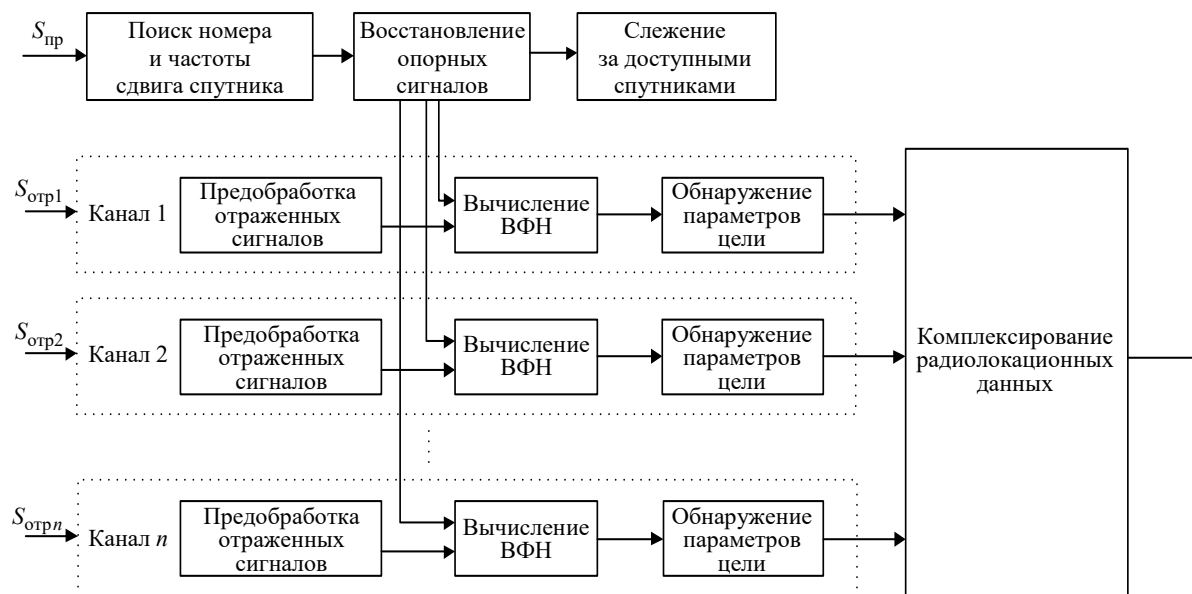


Рис. 15. Структурная схема обработки сигналов МП ПА РЛС с использованием многоканального приемника

Fig. 15. Block diagram of processing signals of a multistatic passive radar system using a multichannel receiver

приемных позиций, а автором статьи предложено построить МП ПА РЛС с одной приемной станцией и несколькими существующими спутниковыми передатчиками, что обеспечит низкую стоимость изготовления станции. В табл. 3 приведены основные параметры спутников систем навигации GPS, GLONASS и GALILEO [13–15]. Основной способ разделения сигналов в спутниковой системе – кодовый. Данный способ удобен при построении МП РЛС, которое заключается в том, что на одной частоте приемное устройство принимает одновременно сигналы от нескольких спутниковых передатчиков – источников сигналов подсвета. Количество спутников всех систем глобальной навигации достаточно велико, в каждой точке земной поверхности всегда одновременно принимаются сигналы от нескольких спутников системы навигации GPS L1 C/A-кода (более 4 спутников). При создании МП ПА РЛС по концепции с несколькими спутниковыми передатчиками и одной приемной позицией увеличивается условная вероятность правильного обнаружения объекта наблюдения. Принимаемые сигналы в опорном канале приемной станции будут различаться между собой с помощью

сформированного генератором кода спутников. На ПС используем фазированную антенную решетку со специализированной аналого-цифровой микросхемой, что позволяет формировать нужную ДН, а также увеличивать коэффициент усиления антенны в канале наблюдения приемной станции. Предлагаемая структура схемы обработки сигналов в МП ПА РЛС с использованием многоканального приемника представлена на рис. 15. В блоке предобработки отраженных сигналов осуществляется формирование нужной ДН антенны наблюдения и идентификация каналов по коду, соответственно, с доступными в реальное время спутниками.

Обработка сигналов осуществляется в каждом отдельном канале многоканального приемника, в которых принимаются отраженные сигналы от цели отдельных спутниковых сигналов подсвета. Положение одной и той же цели измеряется совокупностью N каналов, соответственно, со своей среднеквадратичной ошибкой. На основе полученных параметров от цели осуществляется комплексирование радиолокационных данных с помощью метода наименьших квадратов.

Список литературы

1. Радиолокация по сигналам сторонних источников. Ч. 1: Современное состояние / А. В. Бархатов, В. И. Веремьев, Д. А. Ковалев, А. А. Коновалов, В. Н. Михайлов // Инновации. 2013. № 9. С. 8–13.
2. Пассивная когерентная радиолокация / А. В. Бархатов, В. И. Веремьев, Е. Н. Воробьев, А. А. Коновалов, Д. А. Ковалев, В. М. Кутузов, В. Н. Михайлов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2016. 162 с.
3. Maritime moving target indication using passive GNSS-based bistatic radar / M. Hui, A. Michail, D. Pastina, F. Santi, F. Pieralice, M. Bucciarelli, M. Cherniakov // IEEE transactions on aerospace and electronic systems. 2018. Vol. 54, № 1. P. 115–130. doi: 10.1109/TAES.2017.2739900
4. Santi F., Pastina D., Bucciarelli M. Maritime moving target detection technique for passive bistatic radar with GNSS transmitters // The 18th intern. radar symp. IRS. Prague, Czech Republic, 28–30 June 2017. IEEE, 2017. P. 1–10. doi: 10.23919/IRS.2017.8008214
5. Нгуен Ван Куан, Маркелова М. А., Веремьев В. И. Анализ возможности использования спутниковых сигналов подсвета для пассивной радиолокационной системы // Вестн. Новгород. гос. ун-та. Сер. Технические науки. 2019. № 4 (116). С. 86–91. doi: 10.34680/2076-8052.2019.4(116).86-91
6. Нгуен Ван Куан. Пассивная радиолокационная система мониторинга движения судов в прибрежных районах с использованием спутниковых сигналов подсвета // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 3. С. 41–52. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-3-41-52
7. Santi F., Antoniou M., Pastina D. Point Spread Function Analysis for GNSS-Based Multistatic SAR // IEEE Geoscience and Remote Sensing Lett. 2015. Vol. 12, № 2. P. 304–308. doi: 10.1109/LGRS.2014.2337054
8. GPS Interface Specification IS-GPS-200, Revision M – May 2021. URL: <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200M.pdf> (дата обращения 11.01.2022)
9. Kaplan E. D. Understanding GPS: principles and applications. 2nd ed. London: Artech House, 2006. 723 p.
10. Навигационные антенные модули аппаратуры ГНСС / С. Н. Бойко, А. В. Исаев, С. В. Косякин, Ю. С. Яскин // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. Т. 3, вып. 3. С. 4–11.
11. USRP B200, B210. USRP hardware driver and USRP manual. URL: https://files.ettus.com/manual/page_usrp_b200.html (дата обращения 10.11.2021)
12. Нгуен Ван Куан, Воробьев Е. Н. Концепция построения многопозиционной радиолокационной системы мониторинга движения судов с использованием сигналов спутниковых навигационных систем // 76-я науч.-техн. конф. Санкт-Петерб. НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященная Дню радио: сб. докл. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2021. С. 38–41.
13. Veremyev V. I., Vorobev E. N., Kokorina Yu. V. Feasibility Study of Air Target Detection by Passive Radar Using Satellite-based Transmitters // 2019 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). St. Petersburg, Russia, 28–31 January 2019. IEEE, 2017. P. 154–157. doi: 10.1109/ElConRus.2019.8656630
14. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. URL: https://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf (дата обращения 11.01.2022)
15. European GNSS (Galileo) open service. Signal-in-space interface control document. OS SIS ICD, Issue 1.3. December 2016. URL: <https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SIS-ICD.pdf> (дата обращения 11.01.2022)

Информация об авторе

Нгуен Ван Куан – инженер по направлению "Специальные радиотехнические системы" (2018), аспирант Государственного технического университета им. Ле Куй Дона (Ханой, Вьетнам). Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов: радиолокационные системы мониторинга.

Адрес: Государственный технический университет им. Ле Куй Дона, 236 Хоанг Куок Вьет, Ко Нхуэ, Бак Ты Лиэм, Ханой, Вьетнам

E-mail: quanvnhath@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-3644-0932>

References

1. Barkhatov A. V., Veremyev V. I., Kovalev D. A., Kononov A. A., Mikhailov V. N. Radars with Transmitters-of-Opportunity. Part 1: State-of-the-Art. Innovations. 2013, no. 9, pp. 8–13. (In Russ.)
2. Barkhatov A. V., Verem'ev V. I., Vorob'ev E. N., Kononov A. A., Kovalev D. A., Kutuzov V. M., Mikhailov V. N. *Passivnaya kogerentnaya radiolokatsiya* [Passive Coherent Radar]. SPb., *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2016, 164 p. (In Russ.)
3. Hui M., Michail A., Pastina D., Santi F., Pieralice F., Bucciarelli M., Cherniakov M. Maritime Moving Target Indication Using Passive GNSS-Based Bistatic Radar. IEEE transactions on aerospace and electronic systems. 2018, vol. 54, no. 1, pp. 115–130. doi: 10.1109/TAES.2017.2739900
4. Santi F., Pastina D., Bucciarelli M. Maritime Mov-

ing Target Detection Technique for Passive Bistatic Radar with GNSS Transmitters. The 18th intern. radar symp. IRS. Prague, Czech Republic, 28–30 June 2017. IEEE, 2017, pp. 1–10. doi: 10.23919/IRS.2017.8008214

5. Nguyen Van Quan, Markelova M. A, Veremyev V. I. On the Satellite Systems Signals as Sources of Illumination for the Bistatic Radar System. *Vestn. Novgorod. gos. un-ta. Ser. Tekhnicheskie nauki*. 2019, no. 4 (116), pp. 86–91. doi: 10.34680/2076-8052.2019.4(116) (In Russ.)

6. Nguyen Van Quan. A Passive Radar System for Monitoring of Coastal Areas Ship Traffic Using Satellite Illumination Signals. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2020, vol. 23, no. 3, pp. 41–52. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-3-41-52 (In Russ.)

7. Santi F., Antoniou M., Pastina D. Point Spread Function Analysis for GNSS-Based Multistatic SAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2015, vol. 12, no. 2, pp. 304–308. doi: 10.1109/LGRS.2014.2337054

8. GPS Interface Specification IS-GPS-200, Revision M – May 2021. Available at: <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200M.pdf> (accessed 11.01.2022)

9. Kaplan E. D. Understanding GPS: principles and applications. 2nd ed. London, Artech House, 2006, 723 pp.

10. Boiko S. N., Isaev A. V., Kosyakin S. V., Yaskin Yu. S. Navigational Antenna Modules of the GNSS Equipment. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2016, vol. 3, iss. 3, pp. 4–11. (In Russ.)

11. USRP B200, B210. USRP hardware driver and USRP manual. Available at: <https://files.ettus.com/>

manual/page_usrp_b200.html (accessed 10.11.2021)

12. Nguyen Van Quan, Vorobev E. N. *Kontseptsiya postroeniya mnogopozitsionnoy radiolokatsionnoy sistemi monitoringa dvizheniya sudov s ispolzovaniem signalov sputnikovikh navigatsionnikh system* [The Concept of Building a Multi-Position Radar System for Monitoring the Movement of Ships Using Signals from Satellite Navigation Systems]. *76-ya Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya Sankt-Peterburgskogo NTO RES im. A. S. Popova, posvyashchennaya Dnyu radio: sb. Dokladov*. SPb., Izd-vo SPbGETU "LETI", 2021, pp. 38–41 (In Russ.)

13. Veremyev V. I., Vorobev E. N., Kokorina Yu. V. Feasibility Study of Air Target Detection by Passive Radar Using Satellite-based Transmitters. 2019 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St Petersburg, Russia, 28–31 January 2019. IEEE, 2017, pp. 154–157. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8656630

14. Navigation Radio Signal in the Ranges L1, L2. Global Navigation Satellite System GLONASS. Available at: https://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf (accessed 11.01.2022)

15. European GNSS (Galileo) open service. Signal-in-space interface control document. OS SIS ICD, Issue 1.3. December 2016. Available at: <https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SIS-ICD.pdf> (accessed 11.01.2022)

Information about the author

Nguyen Van Quan, engineer on special radio systems (2018), PhD student in Le Quy Don Technical University (Hanoi, Vietnam). The author of more than 3 scientific publications. Area of expertise: radar monitoring systems. Address: Le Quy Don Technical University, 236 Co Nhue, Bac Tu Liem, Ha Noi, Viet Nam.
E-mail: quanvnhath@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-3644-0932>

Радиолокация и радионавигация

УДК 621. 37

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-1-17-27>

Пространственное линейное кодирование сигналов в совместной системе радиолокации и многоадресной радиосвязи

Д. В. Штарев¹, Е. А. Маврычев^{2✉}

¹ ПАО «НПО "Алмаз" им. академика А. А. Расплетина», Москва, Россия

² Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
Нижний Новгород, Россия

✉ mavrychev.eugene@mail.ru

Аннотация

Введение. В статье решается актуальная задача разработки методов оптимизации амплитудно-фазового распределения в передающей антенной решетке в системе, в которой используется общий сигнал для многоадресной передачи данных и радиолокационного зондирования в заданном секторе пространства. Выбор целевой функции для оптимизационной задачи основывается на двух подходах. Первый подход заключается в минимизации излучаемой мощности при заданном качестве обслуживания пользователей и радиолокационного наблюдения. Второй подход основан на оптимизации качества обслуживания в наихудшем канале передачи данных и радиолокационного наблюдения при заданном бюджете мощности. Величиной, определяющей качество обслуживания, является отношение сигнал/шум как для передачи данных, так и для радиолокации.

Цель работы. Решение задачи оптимизации пространственного линейного кодирования сигналов в совместной системе многоадресной радиосвязи и радиолокации, в которой используется общий временной сигнал.

Материалы и методы. Оптимизация пространственного линейного кодирования в совместной системе радиосвязи и радиолокации основывается на методах статистической теории и методах теории оптимизации с использованием численного решения оптимизационных задач. Характеристики системы анализируются с помощью математического моделирования на основе метода Монте-Карло. Статистическое моделирование выполняется в среде MATLAB с использованием стандартных средств, а также пакета CVX для численного решения выпуклых оптимизационных задач.

Результаты. Сформулированы оптимизационные задачи на основе критериев минимума излучаемой мощности и максимума отношения сигнал/шум в наихудшем канале. В обоих случаях используется ограничение на излучаемую мощность отдельными антенными каналами. Оптимизационные задачи приближенно сводятся к выпуклым задачам с полуопределенными условиями, которые решаются с помощью хорошо известного алгоритма внутренней точки, имеющего полиномиальную сложность. Проведено статистическое моделирование, в результате которого получены оптимальные характеристики совместной системы, а именно зависимости излучаемой мощности от порогового отношения сигнал/шум и зависимости отношения сигнал/шум в наихудшем канале от бюджета мощности.

Заключение. Предложены методы оптимального линейного кодирования в антенной решетке, основанные на численном решении оптимизационных задач, которые рекомендуется использовать при разработке совместной системы многоадресной радиосвязи и радиолокации.

Ключевые слова: многофункциональные радиосистемы, совместное использование радиочастотных ресурсов, пространственное кодирование, многоадресная передача, выпуклая оптимизация, квадратичное программирование с квадратичными условиями

Для цитирования: Штарев Д. В., Маврычев Е. А. Пространственное линейное кодирование сигналов в совместной системе радиолокации и многоадресной радиосвязи // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 1. С. 17–27. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-17-27

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензенту за полезные замечания, которые позволили существенно улучшить качество работы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 22.09.2021; принята к публикации после рецензирования 22.12.2021; опубликована онлайн 28.02.2022



Spatial Linear Coding in Joint Radar and Multicast Communication Systems

Dmitry V. Shtarev¹, Evgeny A. Mavrychev^{2✉}

¹PJSC "ALMAZ R&P Corp.", Moscow, Russia

²Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

✉ mavrychev.eugene@mail.ru

Abstract

Introduction. This paper presents optimization methods for the amplitude-phase distribution in a transmitting antenna array in a system with a common signal for multicast data transmission and radar sensing in a given sector of space. Two approaches are considered for the choice of an objective function for the optimization problem. The first approach involves minimizing the transmitted power for a given quality of user service and radar surveillance. The second approach involves optimizing the quality of service for the worst radar and communication channel under a given power budget. The value that determines the quality of service is the signal-to-noise ratio, for both communication and radar.

Aim. To solve the optimization problem of spatial linear coding of signals in a joint multicast radar and communication system, which shares a common signal.

Materials and methods. Optimization of spatial linear coding in a joint radio radar and communication system was carried out by the methods of statistical theory and optimization theory using the numerical solution of optimization problems. The performance characteristics of the system were analyzed by Monte Carlo simulation. Statistical simulation was performed in the MATLAB environment using standard tools, as well as the CVX package for the numerical solution of convex optimization problems.

Results. Optimization problems were formulated based on the criteria of the minimum radiated power and the maximum signal-to-noise ratio in the worst channel. A limitation on the radiated power of individual antenna channels was used for both cases. Optimization problems were approximately reduced to convex problems with semidefinite constraints, which could be solved using the well-known interior point algorithm with polynomial complexity. The performed statistical simulation produced optimal performance characteristics of a joint system, including the total power versus the threshold signal-to-noise ratio and the signal-to-noise ratio for the worst channel versus the power budget.

Conclusion. The proposed numerical optimization methods for spatial linear coding in a transmitting antenna array can be recommended when designing joint radar communication systems.

Keywords: multifunctional system, joint bandwidth utilization, spatial coding, multicast transmission, convex optimization, quadratically constrained quadratic programming

For citation: Shtarev D. V., Mavrychev E. A. Spatial Linear Coding in Joint Radar and Multicast Communication Systems. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 1, pp. 17–27. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-17-27

Acknowledgments. The authors are grateful to the referee for useful comments, which allowed to significantly improve the quality of the work.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 22.09.2021; accepted 22.12.2021; published online 28.02.2022

Введение. Системы радиосвязи и радиолокации различного назначения занимают существенное место в использовании радиочастотного спектра. Потребность увеличения скорости передачи данных диктует необходимость расширения полос сигналов в системах радиосвязи и освоения более высокочастотных диапазонов [1]. В то же время системы радиолокации непрерывно развиваются и находят применения в новых задачах. К таким задачам можно отнести автомобильные радары [2], осуществляющие радиолокационное

наблюдение за дорожной обстановкой и обеспечивающие информацией системы помощи водителю. В беспилотных автомобилях радиолокационные данные являются важнейшим источником информации для управления и принятия решений [3–5]. В общем случае можно рассматривать не только автомобили, а любые другие беспилотные автономные объекты, которые сосуществуют в некоторой среде и взаимодействуют с другими объектами, решая индивидуальные или совместные задачи.

Пространственное линейное кодирование сигналов
в совместной системе радиолокации и многоадресной радиосвязи
Spatial Linear Coding in Joint Radar and Multicast Communication Systems

В связи с этим актуальным вопросом является эффективное использование радиочастотного спектра, что стало поводом для развития такого направления, как совместное использование радиочастотных ресурсов для нужд радиолокации и радиосвязи, широко обсуждаемого в научной литературе в последние годы [5–12]. Согласно [6] можно выделить три уровня интеграции систем радиосвязи и радиолокации: независимое существование, взаимное сосуществование и совместные системы. При независимом существовании системы радиосвязи и радиолокации работают независимо друг от друга, создавая взаимные помехи. Эффективное разделение радиочастотных ресурсов при взаимном сосуществовании систем радиосвязи и радиолокации достигается за счет минимизации взаимных помех. Наиболее высоким уровнем интеграции являются совместные системы, в которых осуществляются функции радиосвязи и радиолокации внутри одного частотного диапазона на общей аппаратной платформе, что снижает стоимость оборудования. Отметим, что в рассмотренной задаче взаимодействия беспилотных автономных объектов применение совместных систем радиосвязи и радиолокации выглядит наиболее привлекательным [4, 5], так как каждому автономному объекту требуются радиолокационные данные и необходимо осуществлять обмен информацией с другими объектами.

Совместное проектирование предполагает использование как отдельных сигналов для радиосвязи и радиолокации, так и общих сигналов, которые позволяют решать обе функциональные задачи. Таким образом, при совместном проектировании возникает проблема пространственно-временного формирования сигналов, которую, как правило, разделяют на две независимые задачи: синтеза временных сигналов и оптимизации пространственного кодирования. Методы совместного синтеза сигналов рассматриваются в [7, 8]. Методы пространственной селекции сигналов и оптимизации пространственного кодирования сигналов в системах с антенными решетками рассматриваются в [8–12].

В большинстве работ по пространственному кодированию рассматривается режим передачи данных с множественным доступом. В [9] предлагается два подхода отдельного и совместного использования апертуры антенной решетки для задач радиосвязи и радиолокации. При совместном использовании антенной решетки задача оптимизации амплитудно-фазового распределе-

ния ставится как минимизация квадрата ошибки между реальной и желаемой диаграммами направленности антенной решетки при условии обеспечения заданного качества обслуживания пользователей. Далее рассматривается численное решение задачи на основе метода сопряженных градиентов. Более сложная целевая функция, рассматриваемая в [10], дополнительно включает слагаемое, позволяющее уменьшить уровень боковых лепестков диаграммы направленности ММО радара. Задача оптимизации сводится к полуопределенному программированию и решается численным методом на основе алгоритма внутренней точки.

В [12] рассматривается пространственное кодирование сигналов в совместной системе радиолокации и радиосвязи с многоадресной передачей. Предлагается максимизировать скорость передачи для наихудшего пользователя при условии, что отношение сигнал/(шум + помеха) не хуже заданной пороговой величины. Полагается, что отраженные от целей и пассивных помех сигналы находятся в одном элементе дальности и имеют одинаковое доплеровское смещение частоты, а пространственное положение источников известно. Такая постановка задачи оптимизации имеет отношение к работе радиолокатора в режиме сопровождения целей.

В данной статье рассматривается совместная система с антенной решеткой на передачу, в которой осуществляется многоадресная передача данных нескольким абонентам и одновременное зондирование заданного сектора пространства. Предполагается, что используется общий временной сигнал как для радиосвязи, так и для радиолокации. Рассматривается два критерия качества: минимизация излучаемой мощности при условии достижения заданного качества связи и зоны покрытия радиолокатора и максимизация наихудшего качества связи и обнаружения при ограничении бюджета мощности. Мерой качества радиосвязи и радиолокационного наблюдения предлагается использовать отношение сигнал/шум (ОСШ), что позволяет оптимизировать одновременно и характеристики передачи данных, и характеристики радиолокатора. Оптимизация ОСШ для радиолокационного наблюдения эквивалентна оптимизации дальности обнаружения в заданном секторе угловых положений.

В основе предлагаемого подхода лежат методы оптимизации линейного пространственного кодера, которые были разработаны в [13, 14] для многоадресной передачи данных. Постановка

задачи и подход к ее решению в настоящей работе наиболее близок к [12]. Новизна данной работы состоит в следующем. Во-первых, рассматривается критерий минимизации излучаемой мощности при заданном качестве обслуживания пользователей и радиолокационного наблюдения. Во-вторых, в задаче оптимизации наихудшего качества обслуживания целевая функция включает как характеристику качества передачи данных, так и характеристику радиолокационного обнаружения, определяемых величиной ОСШ. Отметим, что в [12] рассматривается оптимизация качества передачи данных при заданных характеристиках радиолокационного наблюдения, а в [10] – оптимизация радиолокационного наблюдения при заданном качестве связи.

Целью работы является оптимизация весовых коэффициентов в антенной решетке на передачу или оптимизация пространственного линейного кодера сигнала в системе совместного использования ресурсов для радиолокации и многоадресной передачи данных. Полученные оптимизационные задачи сводятся к задачам выпуклой оптимизации, которые могут быть решены с помощью известных алгоритмов математического программирования [15]. Представлены численные примеры, показывающие эффективность предложенных подходов.

Модель системы. Рассмотрим радиотехническую систему с антенной решеткой, в которой одновременно осуществляется многоадресная передача данных и радиолокационное зондирование. Излучаемый сигнал, используемый для зондирования, описывается комплексной амплитудой $s(t)$, в которой закодирована передаваемая информация для M пользователей. Временная структура и модуляция сигнала $s(t)$ могут быть любыми и не являются предметом рассмотрения данной работы. Будем полагать, что средняя мощность комплексной амплитуды нормирована и равна $E\{|s(t)|^2\} = 1$, где $E\{\cdot\}$ – статистическое усреднение.

Комплексные амплитуды излучаемого сигнала в N -элементной антенной решетке будем представлять в виде вектора $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T \in \mathbb{C}^N$, где $[\cdot]^T$ – операция транспонирования; $\mathbb{C}^N$ – множество комплексных векторов размерности $N \times 1$. Антенная

решетка имеет произвольную известную геометрию, которая описывается комплексным вектором $\mathbf{a}(\theta) = [a_1(\theta), a_2(\theta), \dots, a_N(\theta)]^T \in \mathbb{C}^N$ отклика антенной решетки на сигнал с направления θ . Пространственное кодирование сигнала представляется в виде простого преобразования комплексной амплитуды $s(t)$ весовыми коэффициентами

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}s(t),$$

где $\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_N]^T \in \mathbb{C}^N$ – вектор весовых коэффициентов.

Задача пространственного кодирования на передачу заключается в выборе оптимального вектора весовых коэффициентов в соответствии с выбранным критерием качества. Выбор критерия качества зависит от системных требований. Будем рассматривать два критерия [13], которые часто используются в многоадресной и многопользовательской связи. Первый критерий заключается в минимизации излучаемой мощности при условии достижения заданного качества обслуживания и параметров обнаружения целей. Второй критерий основан на совместной максимизации качества обслуживания для наихудшего пользователя и зоны обзора в наихудшем направлении при условии заданного бюджета мощности передатчика. При этом целевыми параметрами, характеризующими качество обслуживания и зону обзора, являются нормированные значения ОСШ. Прежде чем переходить к математической формализации оптимизационных задач, рассмотрим энергетические характеристики, на которых основываются данные критерии.

Среднюю излучаемую мощность можно записать в виде

$$P = E\{\|\mathbf{x}(t)\|_2^2\} = \|\mathbf{f}\|_2^2 = \mathbf{f}^H \mathbf{f}, \quad (1)$$

где $\|\cdot\|_2$ – норма второго порядка вектора, которая для произвольного вектора $\mathbf{a} \in \mathbb{C}^N$ представляется в виде $\|\mathbf{a}\|_2 = \sqrt{\sum_{n=1}^N |a_n|^2}$; $[\cdot]^H$ – операция эрмитова сопряжения.

Рассмотрим модели сигналов для радиосвязи и радиолокации. Сигнал в приемнике m -го пользователя представляется в виде

$$y_m(t) = \mathbf{h}_m^H \mathbf{x}(t) + v_m(t), \quad (2)$$

где $\mathbf{h}_m \in \mathbb{C}^N$ – вектор коэффициентов передачи от антенных элементов передающей станции до приемной антенны m -го пользователя, учитывающий многолучевое распространение сигналов; $v_m(t)$ – шум приемника m -го пользователя, мощность которого нормирована $E\{|v_m(t)|^2\} = 1$.

Тогда ОСШ для m -го пользователя будет представляться в виде

$$\rho_m = |\mathbf{h}_m^H \mathbf{f}|^2 = \mathbf{f}^H \mathbf{h}_m \mathbf{h}_m^H \mathbf{f}.$$

Сигнал в приемнике, отраженный от цели, находящейся в направлении θ относительно передающей станции, запишем в виде

$$z(t, \theta) = \sigma \mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{x}(t - \tau) + v_0(t),$$

где σ – энергетический коэффициент, учитывающий эффективную поверхность рассеяния цели, потери при распространении и т. д.; τ – время задержки сигнала; $v_0(t)$ – шум радиолокационного приемника, мощность которого будем считать нормированной и равной $E\{|v_0(t)|^2\} = 1$.

ОСШ для направления θ_k будет представляться в виде

$$\mu_k = \sigma^2 |\mathbf{a}^H(\theta_k) \mathbf{f}|^2 = \sigma^2 \mathbf{f}^H \mathbf{a}(\theta_k) \mathbf{a}^H(\theta_k) \mathbf{f}.$$

Минимизация излучаемой мощности. Рассмотрим оптимизацию линейного кодера на основе критерия минимума излучаемой мощности. Данный принцип основывается на том, чтобы обеспечить решение задач радиолокации и радиосвязи с заданным качеством обслуживания при использовании минимальной излучаемой мощности. Качеством обслуживания для системы радиосвязи служит вероятность ошибочного приема, а для системы радиолокации – вероятность правильного обнаружения при фиксированной вероятности ложной тревоги. В обоих случаях параметры качества обслуживания связаны монотонной функциональной зависимостью с ОСШ. Поэтому уместной является следующая постановка задачи оптимизации линейного кодера:

$$\begin{aligned} \min P, \\ s. t. \quad \rho_m \geq \rho_0, m = 1, \dots, M; \\ \mu_k \geq \mu_0, k = 1, \dots, K, \end{aligned} \quad (3)$$

где ρ_0, μ_0 – пороговые значения ОСШ для задач

радиосвязи и радиолокации соответственно; K – количество рассматриваемых угловых положений в секторе радиолокационного обзора.

В (3) целевой функцией является полная излучаемая мощность, определяемая выражением (1). Функциями условий являются неравенства, согласно которым ОСШ для каждого обслуживаемого пользователя и ОСШ в радиолокационном приемнике для каждого зондируемого направления должны быть не меньше пороговых значений ρ_0 и μ_0 соответственно. Условие $\rho_m \geq \rho_0$ обеспечивает вероятность ошибочного приема для m -го пользователя не выше заданной; условие $\mu_k \geq \mu_0$ обеспечивает вероятность обнаружения не ниже заданной для цели в направлении θ_k , $k = 1, \dots, K$.

Однако для практической реализации представляет интерес задача с дополнительными ограничениями на индивидуальные мощности, излучаемые отдельными антенными элементами, в виде $E\{|x_n(t)|^2\} = |f_n|^2 \leq P$. Такие ограничения связаны с использованием в каждом антенном канале усилителей, имеющих предельно допустимую мощность. Таким образом, получаем следующую задачу оптимизации:

$$\begin{aligned} \min \mathbf{f}^H \mathbf{f}, \\ s. t. \quad \mathbf{f}^H \mathbf{h}_m \mathbf{h}_m^H \mathbf{f} \geq \rho_0, m = 1, \dots, M; \\ \mathbf{f}^H \mathbf{a}(\theta_k) \mathbf{a}^H(\theta_k) \mathbf{f} \geq \mu_0 / \sigma^2, k = 1, \dots, K; \\ \mathbf{f}^H E_n \mathbf{f} \leq P, n = 1, \dots, N, \end{aligned} \quad (4)$$

где E_n – матрица с одним ненулевым элементом на главной диагонали $[E_n]_{n,n} = 1$, а остальные нули.

Задача (4) относится к классу задач квадратичного программирования с квадратичными условиями (QCQP) [15, 16]. Условные функции в (4) являются вогнутыми, поэтому рассматриваемая задача является невыпуклой и не имеет алгоритма решения полиномиальной сложности. Отметим, что область пересечения условий задачи (4) может образовывать пустое множество, т. е. оптимизационная задача может быть несовместной. Это означает, что выделенного бюджета мощности недостаточно, чтобы обеспечить заданное минимальное качество обслуживания для всех пользователей и всех направлений в секторе радиолокационного наблюдения.

Общий подход к решению невыпуклых задач QCQP рассмотрен в [15] и заключается в аппроксимации условий исходной задачи QCQP с помощью линейных условий и условия неотрицательной определенности матрицы, т. е. сведению к задаче полуопределенного программирования, которая является выпуклой и может быть решена с помощью стандартных методов выпуклой оптимизации, а именно с использованием алгоритма внутренней точки [16]. Для приведения задачи (4) к задаче полуопределенного программирования введем матрицу $F = \mathbf{f}\mathbf{f}^H$, которая является неотрицательно определенной $F \succ 0$ (имеет неотрицательные собственные числа) и имеет равный единице ранг: $\text{rank}\{F\} = 1$. Используя данное обозначение, задачу оптимизации (4) можно переписать в эквивалентном виде

$$\begin{aligned} \min_F \text{Tr}\{F\}, \\ \text{s. t. } \text{Tr}\{\mathbf{h}\mathbf{h}_m^H F\} \geq \rho_0, \quad m = 1, \dots, M; \\ \text{Tr}\{\mathbf{a}(\theta_k)\mathbf{a}^H(\theta_k)F\} \geq \mu_0/\sigma^2, \quad k = 1, \dots, K; \quad (5) \\ \text{Tr}\{E_n F\} \leq P_1, \quad n = 1, \dots, N; \\ F \succ 0, \quad \text{rank}\{F\} = 1, \end{aligned}$$

где операция $\text{Tr}\{\cdot\}$ означает след матрицы – сумму диагональных элементов.

В (5) целевая функция и все условия в виде неравенств являются линейными, условие $F \succ 0$ является выпуклым [16], и единственным невыпуклым условием является условие $\text{rank}\{F\} = 1$. Для решения (5) используется ее аппроксимация, в которой исключается невыпуклое условие $\text{rank}\{F\} = 1$. Тогда получаем

$$\begin{aligned} \min_F \text{Tr}\{F\}, \\ \text{s. t. } \text{Tr}\{\mathbf{h}\mathbf{h}_m^H F\} \geq \rho_0, \quad m = 1, \dots, M; \\ \text{Tr}\{\mathbf{a}(\theta_k)\mathbf{a}^H(\theta_k)F\} \geq \mu_0/\sigma^2, \quad k = 1, \dots, K; \quad (6) \\ \text{Tr}\{E_n F\} \leq P_1, \quad n = 1, \dots, N; \\ F \succ 0 \end{aligned}$$

– выпуклую оптимизационную задачу, которую относят к классу задач полуопределенного программирования (semidefinite programming – SDP), так как она содержит условие неотрицательной определенности (или положительной полуопределенности) матрицы. Данная задача может быть решена с использованием стандартных средств

математического программирования на основе алгоритма внутренней точки [16].

Имея матрицу F_* , которая является решением оптимизационной задачи (6), необходимо найти вектор $\mathbf{f}$. Существует несколько способов поиска решения $\mathbf{f}$, которые обсуждаются в [13]. Эти способы, в которых подбираются оптимальные фазовые коэффициенты при суммировании собственных векторов с ненулевыми собственными числами, основаны на методе рандомизации. Этот подбор осуществляется методами случайного поиска. Другим более простым подходом является выбор в качестве решения задачи (4) собственного вектора матрицы F_* , которому соответствует максимальное собственное число. В результате вектор линейного кодирования записывается в виде

$$\mathbf{f} = \sqrt{\lambda_{\max}} \mathbf{u}_{\max}, \quad (7)$$

где $\lambda_{\max}$ – максимальное собственное число матрицы F_* ; $\mathbf{u}_{\max}$ – собственный вектор матрицы F_* , которому соответствует максимально собственное число.

Матрица F_* , как правило, имеет либо только одно ненулевое собственное число, либо одно собственное число, которое существенно превышает все остальные собственные числа. В первом случае решение (7) совпадает с решением исходной задачи, так как выполнено условие $\text{rank}\{F\} = 1$, т. е. решение (7) является точным оптимальным решением. Во втором случае решение (7) является неоптимальным и дает незначительные потери в ОСШ.

Максимизация качества обслуживания для наихудшего случая. В этом случае при ограниченной мощности излучения максимизируется качество обслуживания для наихудшего канала. Аналогично качество связи и радиолокационного наблюдения будем характеризовать величиной ОСШ. Введем нормированные ОСШ для m -го пользователя и k -го углового направления в радиолокаторе:

$$\tilde{\rho}_m = \frac{|\mathbf{h}_m^H \mathbf{f}|^2}{\rho_0}; \quad \tilde{\mu}_k = \frac{\sigma^2 |\mathbf{a}^H(\theta_k) \mathbf{f}|^2}{\mu_0}.$$

Нормированные значения ОСШ введены для совместной оптимизации качества связи и радио-

локации, при этом оптимизационная задача ставится в виде

$$\begin{aligned} \max \min & [\tilde{\rho}_1, \dots, \tilde{\rho}_M, \tilde{\mu}_1, \dots, \tilde{\mu}_K], \\ \text{s. t. } & \mathbf{f}^H E_n \mathbf{f} \leq P_l, n = 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (8)$$

Кроме того, для задачи (8) можно использовать дополнительное условие $\min [\tilde{\rho}_1, \dots, \tilde{\rho}_M, \tilde{\mu}_1, \dots, \tilde{\mu}_K] \geq 1$, которое гарантирует, что наихудшее значение ОСШ будет не ниже порогового значения. Однако в этом случае задача оптимизации может быть несовместной. Поэтому будем рассматривать постановку задачи в виде (8), которая всегда совместна, но нормированные значения ОСШ могут быть меньше единицы, т. е. качество обслуживания будет таким, какое позволяет обеспечить бюджет мощности. Тогда величины ρ_0, μ_0 можно рассматривать как некоторые уровни, при которых качество радиосвязи является равнозначным качеству радиолокационного наблюдения.

Задачу оптимизации (8) представим в эквивалентном виде, введя дополнительную переменную τ :

$$\begin{aligned} \max & \tau, \\ \text{s. t. } & \mathbf{f}^H \mathbf{h} \mathbf{h}_m^H \mathbf{f} \geq \tau \rho_0, m = 1, \dots, M; \\ & \mathbf{f}^H \mathbf{a}(\theta_k) \mathbf{a}^H(\theta_k) \mathbf{f} \geq \tau \mu_0 / \sigma^2, k = 1, \dots, K; \\ & \mathbf{f}^H E_n \mathbf{f} \leq P_l, n = 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (9)$$

Задача (9) является неоднородной невыпуклой задачей QCQP. Способ ее решения полностью аналогичен решению задачи в предыдущем случае. Задачу (9) можно аппроксимировать задачей полуопределенного программирования, в которой исключено невыпуклое условие $\text{rank}\{F\} = 1$ и записываемой в виде

$$\begin{aligned} \max & \tau, \\ \text{s. t. } & \text{Tr}\{\mathbf{h} \mathbf{h}_m^H F\} \geq \tau \rho_0, m = 1, \dots, M; \\ & \text{Tr}\{\mathbf{a}(\theta_k) \mathbf{a}^H(\theta_k) F\} \geq \tau \mu_0 / \sigma^2, k = 1, \dots, K; \\ & \text{Tr}\{E_n F\} \leq P_l, n = 1, \dots, N; \\ & F \succ 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Аналогично предыдущему разделу, найдя решение F^* задачи (10), можно найти вектор $\mathbf{f}$ методом максимального собственного вектора, который будет являться приближенным решением исходной оптимизационной задачи (9).

Кроме того, как альтернатива задаче (8) могут рассматриваться другие способы максимизации качества. Например, максимизация качества связи для наихудшего пользователя при условии, что качество радиолокационного наблюдения не хуже заданного:

$$\begin{aligned} \max \min & [\tilde{\rho}_1, \dots, \tilde{\rho}_M], \\ \text{s. t. } & \mu_k \geq \mu_0, k = 1, \dots, K; \\ & \mathbf{f}^H E_n \mathbf{f} \leq P_l, n = 1, \dots, N, \end{aligned} \quad (11)$$

или, наоборот, максимизация качества радиолокационного наблюдения для наихудшего направления при условии, что качество связи для всех пользователей не хуже заданного:

$$\begin{aligned} \max \min & [\tilde{\mu}_1, \dots, \tilde{\mu}_K], \\ \text{s. t. } & \rho_m \geq \rho_0, m = 1, \dots, M; \\ & \mathbf{f}^H E_n \mathbf{f} \leq P_l, n = 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (12)$$

Обе задачи могут быть несовместны, так как для выполнения условий $\mu_k \geq \mu_0, k = 1, \dots, K$ в задаче (11) или условий $\rho_m \geq \rho_0, m = 1, \dots, M$ в задаче (12) может быть недостаточно имеющегося бюджета мощности. Отметим, что подход к оптимизации аналогичный (11) рассматривается в [9, 10], а подход аналогичный (12) – в [12], но при этом в указанных работах используются другие целевые величины, характеризующие качество связи и радиолокации.

Результаты моделирования. Рассмотрим численные примеры оптимизации линейного кодирования в совместной системе радиосвязи и радиолокации. Моделирование выполняется в среде MATLAB с использованием пакета CVX [17]. Будем рассматривать линейную эквидистантную антенную решетку с числом элементов $N = 16$ и с шагом между излучателями, равным половине длины волны. Пусть передающая станция осуществляет радиолокационное зондирование в секторе $\pm 15^\circ$. Для оптимизации радиолокационного сектора будем рассматривать шесть направлений ($K = 6$) с равномерным шагом в секторе обзора. Количество пользователей M будет переменным в зависимости от сценария. Коэффициенты передачи каналов связи моделируются как случайные величины с комплексным нормальным распределением с нулевым средним и равной единице дисперсией, что соответствует рэлеевской модели канала. Отметим, что в модели сигналов (2) все величины, кроме вектора $\mathbf{f}$,

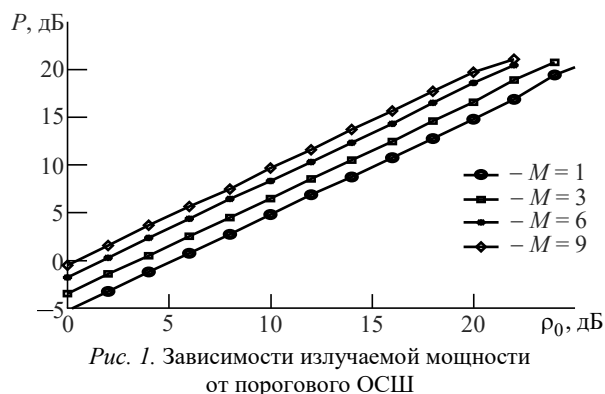


Рис. 1. Зависимости излучаемой мощности от порогового ОСШ

Fig. 1. The total power versus the target signal-to-noise ratio (SNR) являются нормированными к единице. Тогда величина $\|\mathbf{f}\|_2^2$ излучаемой мощности будет определять значение ОСШ. Моделируемые характеристики усредняются по 500-м реализациям.

В первом примере рассматривается задача оптимизации излучаемой мощности (оптимизационная задача (3)). Будем также полагать, что пороговые значения ОСШ для связи и радиолокации соответствуют условию $\rho_0 = \mu_0/\sigma^2$. Максимальная мощность, излучаемая одним элементом, равна $P_1 = 10$ дБ. На рис. 1 показаны зависимости излучаемой мощности от требуемой пороговой величины ОСШ ρ_0 . Показаны четыре зависимости, соответствующие разному числу обслуживаемых пользователей M , а именно 1, 3, 6, 9. При увеличении порогового ОСШ излучаемая мощность линейно растет. Излучаемая мощность также возрастает с ростом числа пользователей, так как требуется больше энергетических ресурсов, чтобы обеспечить заданное качество связи для всех пользователей. Следует отметить, что увеличение числа пользователей не приводит к пропорциональному росту излучаемой мощности. Это связано с тем, что при добавлении нового пользователя ($M+1$) его вектор канальных коэффициентов $\mathbf{h}_{M+1}$ занимает подпространство, образуемое векторами $\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_M$ и $\mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_K)$. Чем больше проекция вектора $\mathbf{h}_{M+1}$ на это подпространство, тем меньше дополнительной мощности потребуется для обслуживания нового пользователя. Другими словами, пространственный спектр мощности сигнала для нового пользователя частично перекрывается с пространственными спектрами других пользователей и лучами, сформированными для обеспечения зоны радиолокационного обзора.

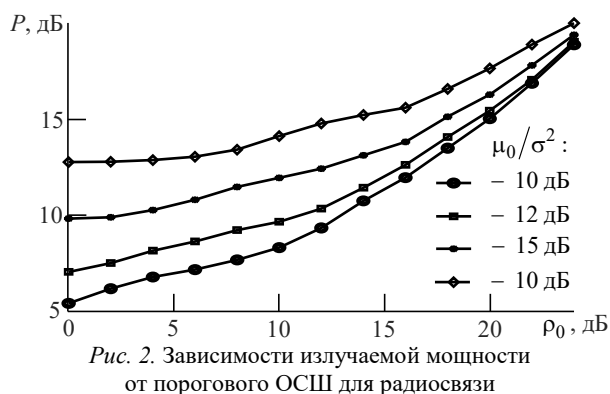


Рис. 2. Зависимости излучаемой мощности от порогового ОСШ для радиосвязи

Fig. 2. The total power versus the target SNR for communication Кроме того, из рис. 1 видно, что кривые имеют обрыв на уровне предельной излучаемой мощности $P = NP_1 = 22$ дБ, так как оптимизационная задача становится несовместной, т. е. бюджета мощности не хватает для того, чтобы обеспечить качество обслуживания не хуже заданного.

Во втором примере также рассматривается задача оптимизации излучаемой мощности. Число обслуживаемых пользователей выбрано $M = 6$, максимальная мощность, излучаемая одним элементом, равна $P_1 = 10$ дБ. Величина порогового ОСШ для радиолокационной задачи μ_0/σ^2 принимает фиксированное значение. На рис. 2 приведены четыре кривые, которые являются зависимостями излучаемой мощности от порогового ОСШ для радиосвязи ρ_0 . Этим кривым соответствуют значения μ_0/σ^2 , равные 10, 12, 15, 18 дБ. Отметим, что в данном случае начальный участок кривых (при малом значении ρ_0) является пологим, так как излучаемая мощность определяется величиной порогового ОСШ для радиолокации μ_0/σ^2 . Далее начинается более резкое нарастание излучаемой мощности, переходящее в линейный рост. Это означает, что при больших значениях ρ_0 излучаемая мощность определяется потребностями радиосвязи.

В третьем примере выполняется оптимизация качества обслуживания для наихудшего случая (оптимизационная задача (8)). Полагается, что $\rho_0 = \mu_0/\sigma^2$. На рис. 3 показана зависимости ОСШ в наихудшем канале $\nu_{\min} = \min[\rho_1, \dots, \rho_M, \mu_1, \dots, \mu_K]$ от бюджета мощности в элементе антенной решетки. Показанным зависимостям соответствует различное число обслуживаемых пользователей M , равное 1, 3, 6, 9.

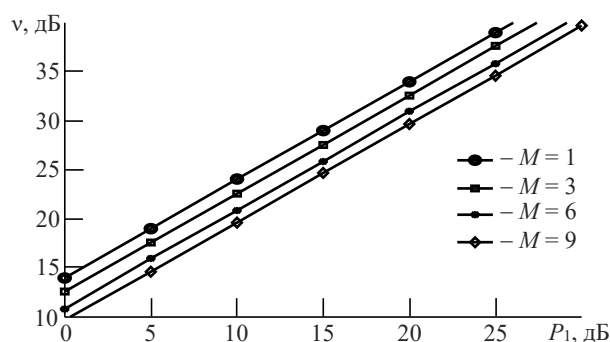


Рис. 3. Зависимости наихудшего ОСШ от бюджета мощности

Fig. 3. The worst SNR versus power budget

Зависимости имеют линейный характер, так как увеличение бюджета мощности дает возможность пропорционально повысить ОСШ в приемниках. Увеличение числа пользователей приводит к уменьшению значения ОСШ, так как имеющиеся энергетические ресурсы расходуются на обслуживание большего количества пользователей. Аналогично первому примеру уменьшение ОСШ не пропорционально увеличению числа пользователей.

Наконец, в четвертом примере выполняется оптимизация качества обслуживания для наихудшего случая при заданном бюджете мощности в каждом антенном канале, который ограничивается максимальной мощностью $P_1 = 10$ дБ. На рис. 4 показаны зависимости ОСШ в наихудшем канале для радиосвязи $\rho_{\min} = \min[\rho_1, \dots, \rho_M]$ и ОСШ для радиолокации $\mu_{\min} = \min[\mu_1, \dots, \mu_K]$ от величины β , которая определяет соотношение между ОСШ для задачи радиосвязи и радиолокации $\beta = \rho_0/\mu_0$, при этом

$$\rho_0 = \sqrt{\beta}, \quad \mu_0 = 1/\sqrt{\beta}.$$

В результате ОСШ в наихудшем канале для радиосвязи $\rho_{\min}$ увеличиваются с ростом величины β , а ОСШ в наихудшем канале для радиолокации

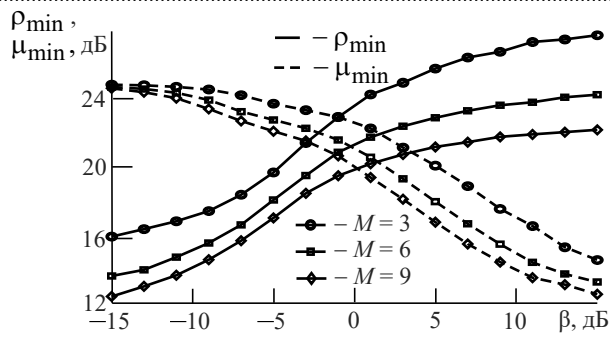


Рис. 4. Зависимости наихудших ОСШ от соотношения пороговых значений ОСШ

Fig. 4. The worst SNR versus the threshold SNR

$\mu_{\min}$ уменьшаются с ростом β . С увеличением числа пользователей значения величин $\rho_{\min}$ и $\mu_{\min}$ уменьшаются, так одинаковые энергетические ресурсы расходуются на обслуживание большего числа пользователей, что приводит к снижению ОСШ. Аналогичные кривые приведены в [12], только в качестве переменного параметра выступает величина порогового значения отношения сигнал/(шум + помеха) для радиолокации, увеличение которой приводит к снижению ресурсов, затрачиваемых на радиосвязь.

Заключение. В статье рассматривается оптимизация кодирования сигнала в антенной решетке совместной системы радиолокации и многоадресной передачи данных. Предлагаются два подхода к оптимизации, получившие распространение в системах многопользовательской связи. Первый подход основан на минимизации суммарной излучаемой мощности, а второй основан на максимизации качества связи для наихудшего канала передачи данных и радиолокационного наблюдения. Задачи оптимизации линейного кодирования были сведены к выпуклым задачам полуопределенного программирования. Представлены результаты моделирования, подтверждающие характеристики оптимального кодирования.

Список литературы

1. 5G network capacity: key elements and technologies / Q. C. Li, H. Niu, A. T. Papathanassiou, G. Wu // IEEE Vehicular Technology Mag. 2014. Vol. 9, № 1. P. 71–78. doi: 10.1109/MVT.2013.2295070
2. Automotive radars: A review of signal processing techniques / S. Patole, M. Torlak, D. Wang, M. Ali // IEEE Signal Process. Mag. 2017. Vol. 34. P. 22–35. doi: 10.1109/MSP.2016.2628914
3. A survey of autonomous driving: common practices and emerging technologies / E. Yurtsever, J. Lambert, A. Carballo, K. Takeda // IEEE Access. 2020. Vol. 8.

P. 58443–58469. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2983149

4. Automotive radar signal processing: research directions and practical challenges / F. Engels, P. Heidenreich, M. Wintermantel, L. Stäcker, M. Al Kadi, A. M. Zoubir // IEEE J. of Selected Topics in Signal Processing. 2021. Vol. 15, № 4. P. 865–878. doi: 10.1109/JSTSP.2021.3063666

5. Joint radar-communications strategies for autonomous vehicles / D. Ma, N. Shlezinger, T. Huang, Y. Liu, Y. C. Eldar // IEEE Signal Processing Mag. 2020. Vol. 37, № 4. P. 85–97. doi: 10.1109/MSP.2020.2983832

6. Radar and communication coexistence: an overview / L. Zheng, M. Lops, Y. C. Eldar, X. Wang // IEEE Signal Processing Mag. 2019. Vol. 36, № 5. P. 85–99. doi: 10.1109/MSP.2019.2907329

7. Toward dual-functional radar-communication systems: Optimal waveform design / F. Liu, L. Zhou, C. Masouros, A. Li, W. Luo, A. Petropulu // IEEE Transactions on Signal Processing. 2018. Vol. 66, № 16. P. 4264–4279. doi: 10.1109/TSP.2018.2847648

8. Toward millimeter wave joint radar-communications: a signal processing perspective / K. V. Mishra, B. Shankar, V. Koivunen, B. Ottersten, S. A. Vorobyov // IEEE Signal Processing Mag. 2019. Vol. 36, № 5. P. 100–114. doi: 10.1109/MSP.2019.2913173

9. MU-MIMO communications with MIMO radar: from co-existence to joint transmission / F. Liu, C. Masouros, A. Li, H. Sun, L. Hanzo // IEEE Trans. On Wireless Communication. 2018. Vol. 17, № 4. P. 2755–2770. doi: 10.1109/TWC.2018.2803045

10. Joint transmit beamforming for multiuser MIMO communications and radar / X. Liu, T. Huang, N. Shlezinger, Y. Liu, J. Zhou, Y. C. Eldar // IEEE Trans. on Signal Processing. 2020. Vol. 68. P. 3929–3944. doi: 10.1109/TSP.2020.3004739

11. Liu X., Huang T., Liu Y. Transmit design for joint MIMO radar and multiuser communications with transmit

covariance constraint. URL: <https://arxiv.org/pdf/2109.00779v1.pdf> (дата обращения 24.01.2022)

12. Multicasting precoder design for vehicular joint radar-communication systems / S. H. Dokhanchi, B. S. Mysore, R. M. Kobayashi, B. Ottersten // Proc. of the 1st IEEE Intern. Online Symp. on Joint Communications & Sensing. Dresden, Germany, 23–24 Feb. 2021. doi: 10.1109/JCS52304.2021.9376334

13. Sidiropoulos N. D., Davidson T. N., Luo Z.-Q. Transmit beamforming for physical-layer multi-casting // IEEE Trans. Signal Processing. 2006. Vol. 54, № 6. P. 2239–2251. doi: 10.1109/TSP.2006.872578

14. Convex optimization-based beamforming / A. B. Gershman, N. D. Sidiropoulos, S. Shahbazpanahi, M. Bengtsson, B. Ottersten // IEEE Signal Processing Mag. 2010. Vol. 27, № 3. P. 62–75. doi: 10.1109/MSP.2010.936015

15. Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems / Z.-Q. Luo, W.-K. Ma, A. M.-C. So, Y. Ye, S. Zhang // IEEE Signal Processing Mag. 2010. Vol. 27, № 3. P. 20–34. doi: 10.1109/MSP.2010.936019

16. Boyd S., Vandenberghe L. Convex Optimization. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 727 p. doi: 10.1017/CBO9780511804441

17. Grant M. C., Boyd S. P. The CVX Users' Guide. URL: <http://cvxr.com/cvx/doc/CVX.pdf> (дата обращения 24.01.2022)

Информация об авторах

Штарев Дмитрий Вадимович – аспирант, начальник отдела ПАО «НПО "Алмаз"». Сфера научных интересов – радиолокация, совместные системы радиолокации и радиосвязи, цифровая микроэлектроника. Адрес: ПАО «НПО "Алмаз" им. академика А. А. Расплетина», Ленинградский пр., д. 80, корп. 16, Москва, 125190, Россия
E-mail: dshtarev@lemz.ru

Маврычев Евгений Александрович – кандидат технических наук (2003), доцент (2012) кафедры информационных радиосистем Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. Автор более 80 научных работ. Сфера научных интересов – статистическая обработка сигналов и ее применение в радиосвязи и радиолокации, теория обнаружения и оценивания, адаптивная обработка сигналов, обработка данных в сетях, машинное обучение. Адрес: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, ул. Минина, д. 24, Н. Новгород, 603950, Россия
E-mail: mavrychev.eugene@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5707-0806>

References

1. Li Q. C., Niu H., Papathanassiou A. T., Wu G. 5G Network Capacity: Key Elements and Technologies. IEEE Vehicular Technology Mag. 2014, vol. 9, no. 1, pp. 71–78. doi: 10.1109/MVT.2013.2295070

2. Patole S., Torlak M., Wang D., Ali M. Automotive Radars: A Review of Signal Processing Techniques. IEEE Signal Process. Mag. 2017, vol. 34, pp. 22–35. doi: 10.1109/MSP.2016.2628914

3. Yurtsever E., Lambert J., Carballo A., Takeda K. A Survey of Autonomous Driving: Common Practices and Emerging Technologies. IEEE Access. 2020, vol. 8, pp. 58443–58469. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2983149

4. Engels F., Heidenreich P., Wintermantel M., Stäcker L., Kadi M. Al, Zoubir A. M. Automotive Radar Signal Processing: Research Directions and Practical Challenges. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. 2021, vol. 15, no. 4, pp. 865–878. doi: 10.1109/JSTSP.2021.3063666

5. Ma D., Shlezinger N., Huang T., Liu Y., Eldar Y. C. Joint radar-communications strategies for autonomous vehicles. IEEE Signal Processing Mag. 2020, vol. 37, no. 4, pp. 85–97. doi: 10.1109/MSP.2020.2983832

6. Zheng L., Lops M., Eldar Y. C., Wang X. Radar and Communication Coexistence: an Overview. IEEE Signal

Processing Mag. 2019, vol. 36, no. 5, pp. 85–99. doi: 10.1109/MSP.2019.2907329

7. Liu F., Zhou L., Masouros C., Li A., Luo W., Petropulu A. Toward Dual-Functional Radar-Communication Systems: Optimal Waveform Design. IEEE Transactions on Signal Processing. 2018, vol. 66, no. 16, pp. 4264–4279. doi: 10.1109/TSP.2018.2847648

8. Mishra K. V., Shankar B., Koivunen V., Ottersten B., Vorobyov S. A. Toward Millimeter Wave Joint Radar-Communications: A Signal Processing Perspective. IEEE Signal Processing Mag. 2019, vol. 36, no. 5, pp. 100–114. doi: 10.1109/MSP.2019.2913173

9. Liu F., Masouros C., Li A., Sun H., Hanzo L. MU-MIMO Communications with MIMO Radar: from Co-Existence to Joint Transmission. IEEE Trans. On Wireless Communication. 2018, vol. 17, no. 4, pp. 2755–2770. doi: 10.1109/TWC.2018.2803045

10. Liu X., Huang T., Shlezinger N., Liu Y., Zhou J., Eldar Y. C. Joint Transmit Beamforming for Multiuser MIMO Communications and Radar. IEEE Trans. on Signal Processing. 2020, vol. 68, pp. 3929–3944. doi: 10.1109/TSP.2020.3004739

11. Liu X., Huang T., Liu Y. Transmit Design for Joint MIMO Radar and Multiuser Communications with Transmit Covariance Constraint. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2109.00779v1.pdf> (accessed 24.01.2022)

12. Dokhanchi S. H., Mysore R. B. S., Kobayashi M., Ottersten B. Multicasting Precoder Design for Vehicular Joint Radar-Communication Systems. Proc. of the 1st IEEE Intern. Online Symp. on Joint Communications & Sensing. Dresden, Germany, 23–24 Feb. 2021. doi: 10.1109/JCS52304.2021.9376334

13. Sidiropoulos N. D., Davidson T. N., Luo Z.-Q. Transmit beamforming for physical-layer multi-casting. IEEE Trans. Signal Processing. 2006, vol. 54, no. 6, pp. 2239–2251. doi: 10.1109/TSP.2006.872578

14. Gershman A. B., Sidiropoulos N. D., Shahbazpanahi S., Bengtsson M., Ottersten B. Convex Optimization-Based Beamforming. IEEE Signal Processing Mag. 2010, vol. 27, no. 3, pp. 62–75. doi: 10.1109/MSP.2010.936015

15. Luo Z.-Q., Ma W.-K., So A. M.-C., Ye Y., Zhang S. Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems. IEEE Signal Processing Mag. 2010, vol. 27, no. 3, pp. 20–34. doi: 10.1109/MSP.2010.936019

16. Boyd S., Vandenberghe L. Convex Optimization. Cambridge, Cambridge University Press, 2004, 727 p. doi: 10.1017/CBO9780511804441

17. Grant M. C., Boyd S. P. The CVX Users' Guide. Available at: <http://cvxr.com/cvx/doc/CVX.pdf> (accessed 24.01.2022)

Information about the authors

Dmitry V. Shtarev, Postgraduate student, Head of the Department of PJSC NPO Almaz. Area of expertise: radar, dual function radar and communication systems, digital microelectronics.
Address: PJSC NPO Almaz, 80, Leningradsky prospect, bldg. 16, Moscow 125190, Russia
E-mail: dshtarev@lemz.ru

Evgeny A. Mavrychev, Cand. Sci. (Eng.) (2003), Associate Professor (2012) on the Department of Information Radio Systems of Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev. The author of more than 80 scientific papers. Area of expertise: statistical signal processing and its application in communications and radar, detection and estimation theory, adaptive signal processing, data processing in networks, machine learning.
Address: Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, 80, Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russia
E-mail: mavrychev.eugene@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5707-0806>

Радиолокация и радионавигация

УДК 621.396.96

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-1-28-35>

**Увеличение разрешающей способности по азимуту
путем экстраполяции функции раскрыва антенной решетки
оцениванием линейного предсказания по методу наименьших квадратов
с использованием коэффициентов авторегрессионной модели**

В. В. Владимиров ✉

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

✉ v.vladimirov87@mail.ru

Аннотация

Введение. Коротковолновые станции обнаружения воздушных объектов ионосферного типа имеют ряд ограниченных технических характеристик, одной из которых является низкая разрешающая способность по азимуту. Она выражается в отсутствии возможности раздельного наблюдения воздушных объектов в группе, расстояние между которыми менее 30 км (на дальности наблюдения 2000 км). Повысить рассматриваемую техническую характеристику возможно внесением изменений в размеры приемной антенной решетки (АР), но такие изменения приводят, как правило, к неоправданным инженерным и финансовым затратам. На практике при пространственно-временной обработке сигнала применяются известные методы сверхразрешения, использование которых, увеличивая разрешающую способность станции, приводит к снижению темпа выдачи результатов наблюдения оператору из-за возникшей вычислительной нагрузки. Необходим поиск компромисса между максимальным достижением показателя разрешающей способности и приемлемой нагрузкой на систему при обработке сигнала.

Цель работы. Анализ фазового распределения на раскрыве АР падающей волны, рассеянной объектами, а также азимутальных портретов этих объектов при выполнении пространственно-временной обработки сигналов после увеличения количества отсчетов комплексной апертурной характеристики функции раскрыва АР.

Материалы и методы. При построении фазовых распределений на раскрыве АР и азимутальных портретов наблюдаемых объектов использовалось компьютерное моделирование в среде MATLAB, которую применяют для широкого спектра инженерных и научных задач разной сложности.

Результаты. Показана возможность использования линейного предсказания для экстраполяции функции раскрыва АР в задаче увеличения разрешающей способности по азимуту коротковолновой станции обнаружения воздушных объектов. Выполнено моделирование. Проведен анализ полученных результатов на примере группового наблюдения воздушных объектов.

Заключение. Полученные результаты доказали актуальность применения предложенной пространственно-временной обработки для коротковолновых станций, имеющих приемные АР больших размеров. Предложенный метод увеличения разрешающей способности имеет меньшую вычислительную нагрузку, что также является большим преимуществом.

Ключевые слова: коротковолновая станция, ионосферное распространение, антенная решетка, фазовое распределение, разрешающая способность, азимутальный портрет целей, спектральное оценивание, метод Берга

Для цитирования: Владимиров В. В. Увеличение разрешающей способности по азимуту путем экстраполяции функции раскрыва антенной решетки оцениванием линейного предсказания по методу наименьших квадратов с использованием коэффициентов авторегрессионной модели // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 1. С. 28–35. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-28-35

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 22.12.2021; принята к публикации после рецензирования 24.01.2022; опубликована онлайн 28.02.2022



Increased Azimuth Resolution by Extrapolating the Antenna Array Aperture Function by Least Squares Linear Prediction Estimation Using Autoregressive Model Coefficients

Vladislav V. Vladimirov ✉

Mozhaisky MSA, St Petersburg, Russia

✉ v.vladimirov87@mail.ru

Abstract

Introduction. Short-wave stations for detecting airborne objects of the ionospheric type have a number of limited technical characteristics, one of which is their low azimuth resolution. This limitation is manifested in the impossibility to separately observe air objects in a group, the distance between which is less than 30 km (at an observation range of 2000 km). The technical characteristics under consideration can be improved by making changes to the dimensions of the receiving antenna array (AA); however, such changes lead, as a rule, to unjustified engineering and financial costs. In practice, space-time signal processing is carried out using conventional super-resolution methods, which, although increasing the resolution of the station, decrease the rate of delivery of observation results to the operator due to an additional computational load. It is necessary to find a compromise between the maximum possible resolution indicator and the acceptable load on the system during signal processing.

Aim. Analysis of the phase distribution of the incident wave scattered by objects at the AA aperture, as well as the azimuthal images of these objects when performing space-time signal processing after extrapolating the AA aperture function by evaluating linear prediction using the least-squares method using autoregressive model coefficients.

Materials and methods. Modelling of phase distributions at the AA aperture and azimuthal images of the observed objects was conducted in the MATLAB environment.

Results. It is shown that the problem of increasing the azimuth resolution of a short-wave station for detecting air objects can be successfully solved using linear prediction based on the least-squares method using autoregressive model coefficients for the extrapolation of the AA aperture function. The results obtained during modelling were analysed using the example of group observation of air objects.

Conclusion. The proposed approach for extrapolation of the AA aperture function for short-wave stations with large receiving AAs proved its relevance. The method proposed for increasing the resolution is characterized by a lower computational load, thereby being promising for practical application.

Keywords: short-wave station, ionospheric propagation, antenna array, phase distribution, resolution, azimuth image of targets, spectral estimation, Burg's method

For citation: Vladimirov V. V. Increased Azimuth Resolution by Extrapolating the Antenna Array Aperture Function by Least Squares Linear Prediction Estimation Using Autoregressive Model Coefficients. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 1, pp. 28–35. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-28-35

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

Submitted 22.12.2021; accepted 24.01.2022; published online 28.02.2022

Введение. При классическом подходе к пространственно-временной обработке сигнала разрешающая способность по азимуту определяется размерами приемной части антенной системы (апертурой антенны) [1–5]. При недостаточных ее размерах (слабой разрешающей способности) невозможно наблюдать раздельнодвигающиеся на небольшом расстоянии друг от друга объекты, что является острой проблемой для станций, работающих в декаметровом диапазоне. Разрешающая способность

по азимуту в таких станциях зачастую не превышает 0.8° , что на дальности наблюдения 2000 км выражается линейным расстоянием около 30 км.

Очевидным способом повышения разрешающей способности является увеличение размеров антенной системы. Однако это оказывается не всегда возможным. В декаметровых станциях антенные системы имеют значительные размеры и их увеличение влечет за собой большие финансовые затраты, инженерные расчеты и серьезные конструктивные сложности.

Увеличение разрешающей способности по азимуту путем экстраполяции функции раскрытия антенной решетки оценением линейного предсказания по методу наименьших квадратов с использованием коэффициентов авторегрессионной модели

Increased Azimuth Resolution by Extrapolating the Antenna Array Aperture Function by Least Squares Linear Prediction Estimation Using Autoregressive Model Coefficients

Одним из путей решения данной проблемы является применение методов обработки сигнала, реализующих процедуры достижения сверхразрешения. Используя значительные вычислительные ресурсы для обработки сигнала указанными методами, зачастую удается добиться улучшения разрешающей способности. Примером таких методов могут служить авторегрессионные оценки спектральной плотности мощности (метод Юла–Уолкера, ковариационный метод, модифицированный ковариационный метод и т. д.), которые подробно рассмотрены в [6–13].

Отмеченные методы позволяют увеличить разрешающую способность, но ставят производителя перед компромиссом между достигаемой разрешающей способностью и степенью гладкости оценки, который определяется выбором порядка модели.

В последнее время приоритетным направлением является внедрение гиперзвуковых летательных аппаратов, наблюдение за которыми также влечет ряд жестких требований по времени выдачи результатов измерений [14–16]. Темп выдачи должен быть максимально быстрым (в режиме реального времени), а пространственно-временная обработка сигналов с использованием перечисленных методов имеет значительные временные затраты, появляющиеся из-за дополнительной вычислительной нагрузки.

Таким образом, разработчики вынуждены искать оригинальные решения, которые смогут обеспечить необходимую разрешающую способность станций, функционирующих в декаметровом диапазоне [2, 3], и тем самым расширить их функциональные возможности по сопровождению воздушных объектов, движущихся на больших скоростях и в группе.

Экстраполяция функции раскрыва антенной решетки (АР) оцениванием линейного предсказания по методу наименьших квадратов с использованием коэффициентов авторегрессионной модели. В большинстве случаев оценивание спектра принимаемого сигнала выполняется с помощью процедур, использующих быстрое преобразование Фурье (БПФ). Данный подход имеет значительную эффективность в вычислительном отношении и обеспечивает получение удовлетворительных результатов при наблюдении объектов на достаточном удалении друг от друга.

Однако, несмотря на указанное достоинство, имеется ряд серьезных ограничений. К ним относится ограничение разрешения, из-за которого не всегда получается разрешить спектральные линии сигналов от двух и более воздушных объек-

тов. Второе ограничение обусловлено неявной весовой обработкой входных данных, выражающейся в распределении энергии главного лепестка формируемого спектра в боковые лепестки, что приводит к наложению и искажению спектров сигналов от других объектов. Слабые сигналы могут быть незаметны в боковых лепестках спектров более сильных сигналов. Речь идет о спектральном оценивании без использования оконных функций, применение которых ослабляет утечку в боковые лепестки, но за счет снижения разрешающей способности [3, 4].

В последнее время вышло большое количество публикаций, посвященных процедурам спектрального оценивания, исследования в которых направлены на ослабление ограничений, присущих подходу на основе БПФ [6–9]. О сигнале, из которого берутся комплексные отсчеты, известна некоторая совокупность сведений, позволяющая сопоставить модель, которая является хорошей его аппроксимацией. В этом случае можно, как правило, получить более точную спектральную оценку, определяя параметры выбранной модели по результатам измерений.

В большинстве случаев подход к спектральному оцениванию выполняется в три этапа. Первый этап состоит в выборе модели исследуемого временного ряда. Второй этап состоит в оценивании параметров принятого сигнала с использованием имеющихся отсчетов данных. Третий этап состоит в получении спектральной оценки путем подстановки оценок параметров модели в расчетное выражение для спектральной плотности мощности (СПМ), соответствующее этой модели. Преимущество такого подхода заключается в том, что при хорошем соответствии выбранной модели наблюдаемым данным получаются более точные оценки СПМ с более высоким разрешением, чем при подходе на основе БПФ.

Платой за улучшение разрешающей способности применением оценивания СПМ является возрастание вычислительной сложности алгоритмов получения оценок (по сравнению с классическим применением БПФ). Основной интерес к методам параметрического спектрального оценивания связан с высокой разрешающей способностью, достигаемой при обработке последовательностей данных, содержащих ограниченное число отсчетов.

В данной статье представлены исследования, направленные на увеличение разрешающей способности по азимуту декаметровой станции путем увеличения функции раскрыва АР. Экстра-

поляция выполняется оцениванием линейного предсказания апертурной характеристики по методу наименьших квадратов с использованием коэффициентов авторегрессионной модели, рассчитанных при спектральном оценивании имеющейся выборки функции раскрыва АР.

Расчет данных коэффициентов выполняется методом спектрального оценивания, который был предложен Джоном Бергом в 1967 г. на 37-й сессии Общества разведочной геофизики, состоявшейся в Оклахома-Сити, где он выступил с докладом на тему "Спектральный анализ по методу максимальной энтропии".

Предложенная пространственно-временная обработка оцениванием линейного предсказания по методу наименьших квадратов существенно отличается от выполнения классической обработки в обычных АР. Использование предложенной обработки позволяет получить высокую разрешающую способность по азимуту при приеме отраженного сигнала на АР стандартного размера.

При выполнении моделирования был рассмотрен сценарий с тремя воздушными объектами, движущимися на расстоянии $R_1 = 1889$ км, $R_2 = 1967$ км, $R_3 = 1976$ км до центрального элемента приемной антенной решетки и азимутом $\alpha_1 = 3.41^\circ$, $\alpha_2 = 5.56^\circ$ и $\alpha_3 = 5.77^\circ$ соответственно. Сложность данного сценария заключается в отсутствии возможности раздельного сопровождения объектов ввиду слабой разрешающей способности станции.

Передающая система излучает гармоническое колебание на несущей частоте $f_{\text{ц}} = 15$ МГц с шириной спектра $\Delta f_{\text{с}} = 20$ кГц.

Рассеянная электромагнитная волна объектами и подстилающей поверхностью после прохождения среды по трассе распространения поступает на вход приемной АР, которая имеет размер апертуры $A = 1300$ м.

В результате выполнения приема и доплеровской обработки принимаемого сигнала формируются комплексные амплитуды в виде зарегистрированного набора данных с шагом дискретизации, равным расстоянию между приемными элементами:

$$\dot{U}_a = A_i e^{jk r_i},$$

где A_i – амплитуда сигнала, принятого i -м элементом АР; k – волновое число; r_i – дальность от объекта до i -го элемента АР.

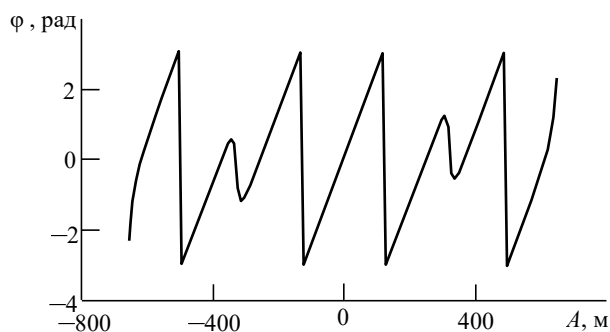


Рис. 1. Фазовый фронт волны на раскрыве антенной решетки
Fig. 1. The phase front of a wave at the antenna array aperture

Фазовый фронт падающей волны, рассеянной тремя моделируемыми объектами, на раскрыве АР будет иметь вид, представленный на рис. 1. Как видно, он представляет собой лишь небольшую часть сигнала, перехватываемую апертурой АР.

С целью получения азимутального портрета наблюдаемых объектов, представляющего собой диаграмму обратного рассеяния (рис. 2), необходимо выполнить дискретное преобразование Фурье.

В результате формирования азимутального портрета можно сделать вывод о недостаточной разрешающей способности по азимуту, так как реальное количество целей известно. Несмотря на то что есть два явных максимума, провал между которыми составляет ниже уровня 0.707 (на основе критерия Рэлея), реальная фоновая сцена состоит из трех объектов, которые на данном портрете наблюдать раздельно невозможно. Разрешающая способность по азимуту определяется размером апертуры АР. Таким образом, проблема заключается в размере информации, перехватываемой апертурой АР, которая соответствует лишь части волнового фронта, заполняющего окружающее пространство.

Предположим, что апертура рассматриваемой АР имеет размер больше, чем $A = 1300$ м. Тогда

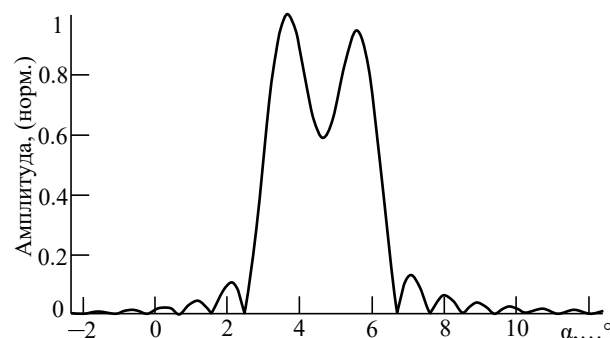


Рис. 2. Азимутальный портрет наблюдаемых объектов
Fig. 2. Azimuthal image of the objects under observation

очевидно, что не перехватываемое до этого АР излучение за пределами размера A сейчас будет приниматься апертурой большего размера и приведет к увеличению разрешающей способности за счет использования дополнительной информации, содержащейся в принятом волновом фронте.

Увеличить объем информации, содержащейся в принятом волновом фронте, предлагается за счет применения экстраполяции измеренных данных элементами АР классического размера.

Экстраполяция функции раскрытия АР выполняется с помощью линейного предсказания новых значений отсчетов комплексных амплитуд вперед и назад, а середина выборки остается заполненной исходными значениями, которые были получены ранее в результате приема и обработки радиолокационного сигнала.

Размер экстраполяции определяется коэффициентом k_3 , который определяет, во сколько раз будет увеличено количество измерений, принятых на апертуру АР стандартного размера.

Количество экстраполированных значений комплексных амплитуд рассчитывается по формуле

$$N_3 = N_A k_3 - N_A,$$

где N_A – количество имеющихся отсчетов сигнала; k_3 – коэффициент экстраполяции.

Далее было рассчитано количество отсчетов, которые заполнят начало N_3^b и конец N_3^f общей выборки:

$$N_3^f = N_3^b = \frac{N_3}{2}.$$

Помимо определения количества экстраполированных значений необходимо правильно их расположить относительно уже имеющихся, другими словами, определить индексы (места) заполнения в векторе экстраполированных значений комплексных амплитуд. Количество индексов соответствует количеству значений после экстраполяции $N_i = N_3$ и имеет значения от 1 до N_3 .

Так как исходная выборка $\dot{U}_a$ располагается в центре вектора значений, индексы крайних отсчетов рассчитываются с использованием выражений для крайнего левого

$$N_i^b = \frac{N_3 - 1}{2} - \left\lfloor \frac{N_3 - 1}{2k_3} \right\rfloor + 1$$

и крайнего правого

$$N_i^f = \frac{N_3 - 1}{2} + \left\lceil \frac{N_3 - 1}{2k_3} \right\rceil + 1.$$

Индексы от N_i^b до N_i^f заполнены значениями исходной выборки $\dot{U}_a$ и в процессе выполнения экстраполяции изменяться не будут.

Для расчета авторегрессионных параметров исходными данными являются комплексные амплитуды $\dot{U}_a$ и выбранный порядок авторегрессионной модели p .

Выбору порядка авторегрессионной модели p (значению порядка фильтра) уделяется особое внимание. Именно выбором порядка модели можно получить сильно сглаженные спектральные оценки (при малом порядке) или, наоборот, увеличить вероятность появления ложных спектральных пиков (при большом порядке).

В данной работе был выбран оптимальный размер авторегрессионной модели, равный половине дискретных отсчетов зарегистрированного сигнала:

$$p = \frac{N_A}{2}.$$

Формула представлена для случая поиска авторегрессионных параметров с целью последующего формирования спектральной плотности мощности (методом Берга), в случае экстраполяции оцениванием линейного предсказания количество N_A будет увеличиваться с каждой итерацией (рекурсия обновления порядка) и принимать значение

$$p = \frac{N_A + n - 1}{2},$$

где n принимает значения от 1 до $\frac{N_A k_3 - 1}{2} - \frac{N_A k_3 - 1}{2k_3}$.

Для расчета авторегрессионных параметров поиск ошибок линейного предсказания выполняется с рекурсии нулевого порядка

$$\dot{e}_0^f(N_A) = \dot{e}_0^b(N_A) = \dot{U}_a(N_A),$$

где $\dot{e}_0^f$ и $\dot{e}_0^b$ – ошибки линейного предсказания нулевого порядка вперед и назад.

Начальное значение параметра авторегрессионной модели $a_0 = 1$. Используя начальные значения a , а также ошибок линейного предсказания

$\dot{\mathbf{e}}_0^f$ и $\dot{\mathbf{e}}_0^b$, рассчитаем коэффициент, получивший название коэффициента отражения $\dot{\mathbf{K}}_p$, который определяется по значениям автокорреляции, соответствующей сдвигам от 0 до $p-1$:

$$\dot{\mathbf{K}}_p = \frac{-2\dot{\mathbf{e}}_{p-1}^f(N_A)\dot{\mathbf{e}}_{p-1}^b(N_A-1)}{\dot{\mathbf{e}}_{p-1}^f(N_A)^2 + \dot{\mathbf{e}}_{p-1}^b(N_A-1)^2}.$$

В алгоритме Берга используется оценка коэффициента отражения, определяемая по методу наименьших квадратов. При каждом значении порядка p в нем минимизируется среднее арифметическое значение ошибок линейного предсказания вперед и назад.

Рекурсивное решение уравнений Юла–Уолкера [6] методом Левинсона [6] связывает авторегрессионные параметры порядка p с параметрами порядка $p-1$ соотношением

$$\dot{\mathbf{a}}_p = \dot{\mathbf{a}}_{p-1} + \dot{\mathbf{K}}_p \dot{\mathbf{a}}_{p-1}^*.$$

Каждую новую итерацию для расчетов очередных значений на интервале p коэффициента отражения и авторегрессионного параметра выполняется пересчет и обновление имеющихся значений ошибок линейного предсказания вперед $\dot{\mathbf{e}}_p^f$ и назад $\dot{\mathbf{e}}_p^b$, которые связывают ошибки предсказания порядка p с ошибками предсказания порядка $p-1$:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{e}}_p^f(N_A) &= \dot{\mathbf{e}}_{p-1}^f(N_A) + \dot{\mathbf{K}}_{p-1} \dot{\mathbf{e}}_{p-1}^b(N_A-1); \\ \dot{\mathbf{e}}_p^b(N_A) &= \dot{\mathbf{e}}_{p-1}^b(N_A-1) + \dot{\mathbf{K}}_{p-1} \dot{\mathbf{e}}_{p-1}^f(N_A).\end{aligned}$$

Результатом выполненных расчетов является вектор комплексных значений авторегрессионных параметров $\dot{\mathbf{a}}_p$, соответствующий размерности $p+1$. На рис. 3 представлена зависимость авторе-

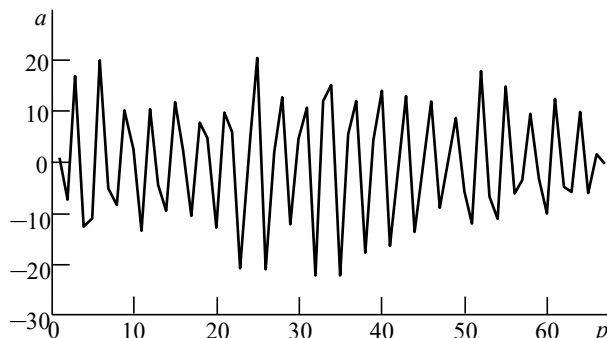


Рис. 3. Авторегрессионные параметры

Fig. 3. Autoregression parameters

Увеличение разрешающей способности по азимуту путем экстраполяции функции раскрытия антенной решетки оцениванием линейного предсказания по методу наименьших квадратов с использованием коэффициентов авторегрессионной модели
Increased Azimuth Resolution by Extrapolating the Antenna Array Aperture Function by Least Squares Linear Prediction Estimation Using Autoregressive Model Coefficients

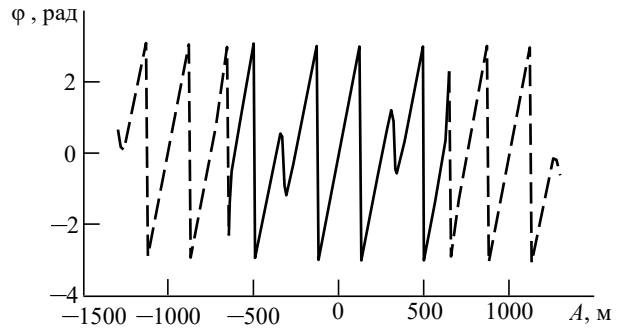


Рис. 4. Фазовый фронт на раскрые антенной решетки до (сплошная линия) и после экстраполяции (штриховая линия)

Fig. 4. The phase front on at the antenna array aperture before (solid line) and after extrapolation (dashed line)

грессионных параметров от размера авторегрессионной модели.

На следующем шаге выполняется применение алгоритма с раздельным линейным предсказанием вперед за пределы имеющейся выборки $\dot{\mathbf{U}}_a$:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{U}}_3(N_A + N_3^f) &= -\dot{\mathbf{U}}_3(N_A + N_3^f) + \\ &+ \dot{\mathbf{a}}_p(m+1)\dot{\mathbf{U}}_3(N_A + N_3^f - m)\end{aligned}$$

и назад

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{U}}_3(N_A - N_3^b) &= -\dot{\mathbf{U}}_3(N_A - N_3^b) + \\ &+ \dot{\mathbf{a}}_p(m+1)\dot{\mathbf{U}}_3(N_A - N_3^b + m),\end{aligned}$$

где m определяет выбор авторегрессионного параметра и принимает значения от 1 до $p-1$.

На рис. 4 представлен результат выполнения предложенной обработки. Сплошная линия соответствует фазовому фронту падающей волны на раскрые АР классического размера, который соответствует исходной выборке $\dot{\mathbf{U}}_a$. Штриховой линией представлено фазовое распределение, построенное с использованием данных $\dot{\mathbf{U}}_3$ после

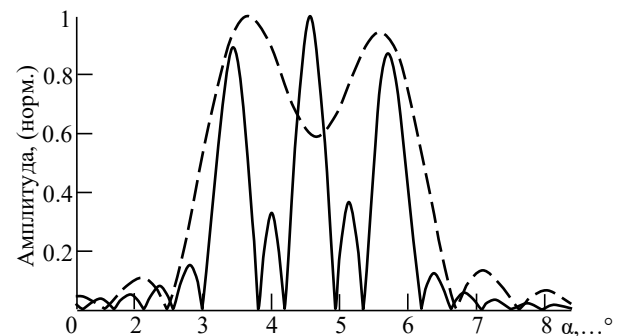


Рис. 5. Азимутальный портрет наблюдаемых объектов до (штриховая линия) и после экстраполяции (сплошная линия)

Fig. 5. Azimuthal image of the objects under observation prior to (dashed line) and following extrapolation (solid line)

выполнения экстраполяции. Результатом выполненных процедур явилось увеличение информации в 2 раза, что соответствует приему сигнала на АР, размером в 2 раза больше реальной.

После выполнения дискретного преобразования Фурье экстраполированной выборки данных $\hat{U}_3$ получен азимутальный портрет (рис. 5), представляющий собой диаграмму обратного рассеяния наблюдаемых объектов. Сплошной линией представлен результат применения предложенной обработки (экстраполяции функции раскрытия); штриховой линией – результат классической обработки.

Как видно, в результате применения предложенной пространственно-временной обработки сигнала появились явные провалы по уровню ниже 0.707. Это свидетельствует об увеличении разрешающей способности и появлении возможности наблюдения трех моделируемых объектов раздельно. Максимумы сформированных спектров

расположены на отметках, соответствующих азимутальному направлению расположения целей.

Выводы. Для реализации рассмотренного подхода требуются меньшие вычислительные затраты ресурсов станции, так как в данном методе решение сложных уравнений Юла–Уолкера реализовано с помощью рекуррентной процедуры (алгоритм Левинсона).

Применение предложенного в статье метода увеличения разрешающей способности по азимуту путем экстраполяции функции раскрытия АР оцениванием линейного предсказания по методу наименьших квадратов с использованием коэффициентов авторегрессионной модели позволило значительно повысить характеристики станции. Исходя из представленных результатов моделирования разрешающая способность по азимуту увеличилась в 2 раза, так как объем данных при выполнении пространственно-временной обработки соответствует объему данных, принятых на АР размера в 2 раза больше, чем истинная.

Список литературы

1. Акимов В. Ф., Калинин Ю. К. Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов / под ред. С. Ф. Боева. М.: Техносфера, 2017. 492 с.
2. Фабрицио Джузеппе А. Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение / пер. с англ. М.: Техносфера, 2018. 936 с.
3. Справочник по радиолокации: в 2 кн. Кн. 2 / под ред. М. И. Скольника; пер. с англ. под ред. В. С. Вербы. М.: Техносфера, 2015. 680 с.
4. Skobelev S. P. Phased array antennas with optimized element patterns. London: Artech house, 2011. 261 p.
5. Stutzman W. L., Thiele G. A. Antenna Theory and Design. New York: John Wiley & Sons, 2012. 823 p.
6. Lagovsky B. A. Superresolution: Simultaneous Orthogonalization of Function Systems Describing the Received Signal and its Source // PIERS Proc. Moscow, Russia, 18–21 Aug., 2012. M.: The Electromagnetics Academy, 2012. P. 993–996.
7. Головкин Т. М. Сравнительный анализ алгоритмов сверхразрешения // LVII Междунар. науч. чтения (памяти В. А. Стеклова): сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Москва, 16 окт. 2019. М.: ЕФИР, 2019. С. 32–37.
8. Тюленев С. В., Нечаев Ю. Б. Сравнительный анализ методов сверхразрешения в антенных решетках // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XVII Междунар. научн.-практ. конф. Воронеж, 9–10 февр. 2017. С. 456–461.
9. Манохин Г. О., Гельцер А. А., Рогожников Е. В. Увеличение разрешающей способности радиолокационной системы за счет параметрических методов обработки сигналов // Вестн. СИБГУТИ. 2015. Т. 29, № 1. С. 15–23.
10. Лаговский Б. А. Сверхразрешение на основе синтеза апертуры цифровыми антенными решетками // Антенны. 2013. Т. 193, № 6. С. 9–16.
11. Чистяков В. А. Сравнительный анализ разрешающей способности методов сверхразрешения MVDR и MUSIC // Молодой ученый. 2020. Т. 306, № 16. С. 165–168.
12. Результаты обработки сигналов радиолокатора сопровождения методами цифрового спектрального анализа со сверхразрешением групповой цели по дальности и скорости / Д. С. Григорян, С. А. Климов, Д. Г. Митрофанов, А. Г. Прохоркин // Радиотехника. 2013. № 9. С. 25–38.
13. Djurovic I., Zhang Y. Accurate Parameter Estimation of Over-the-Horizon Radar Signals Using RANSAC and MUSIC Algorithms // Progress in Electromagnetics Research. M., 2018. Vol. 67. P. 85–93. doi:10.2528/PIERM18022004
14. Семенов С. С. Гиперзвуковые ударные системы нового поколения с использованием управляемых авиационных бомб. URL: <https://topwar.ru/25460-giperzvukovye-udarnye-sistemy-novogo-pokoleniya-s-ispolzovaniem-upravlyaemyh-aviacionnyh-bomb.html> (дата обращения 20.11.2021).
15. Анцупов О. И., Ищук П. Л., Косяк И. В. Гиперзвуковые летательные аппараты: реальна ли опасность // Воздушно-космическая сфера. 2016. № 2. С. 96–105.
16. Li G.-H., Zhang H.-B., Tang G.-J. Typical Trajectory Characteristics of Hypersonic Gliding Vehicle // J. of Astronautics. 2015. Vol. 36, iss. 4. P. 397–403. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2015.04.005

Информация об авторе

Владимиров Владислав Владимирович – соискатель ученой степени кандидата технических наук, научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (Санкт-Петербург). Автор 28 научных работ. Сфера научных интересов – пространственно-временная обработка сигналов, радиолокация.

Адрес: Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, 42-й отдел (научно-исследовательский), ул. Генерала Хрулева, д. 16, Санкт-Петербург, 197348, Россия

E-mail: v.vladimirov87@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2984-9692>

References

1. Akimov V. F., Kalinin Ju. K. *Vvedenie v proektirovanie ionosfernykh zagorizontnykh radiolokatorov* [Introduction to Design of Ionospheric Over-the-Horizon Radars]. Moscow, *Tekhnosfera*, 2017, 492 p. (In Russ.)
2. Fabrizio G. A. High Frequency Over the Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing and Practical Applications. New York, McGraw-Hill, 2013, 944 p.
3. Skolnik M. I. Radar Handbook. Third Edition. New York, McGraw-Hill, 2008, 1352 p.
4. Skobelev S. P. Phased Array Antennas with Optimized Element Patterns. London, Artech house, 2011, 261 p.
5. Stutzman W. L., Thiele G. A. Antenna Theory and Design. New York, John Wiley & Sons, 2012, 823 p.
6. Lagovsky B. A. Superresolution: Simultaneous Orthogonalization of Function Systems Describing the Received Signal and its Source. PIERS Proc. Moscow, Russia, 18–21 August, 2012. Moscow, The Electromagnetics Academy, pp. 993–996.
7. Golovko T. M. *Sravnitel'nyi analiz algoritmov sverkhrazresheniya* [Comparative Analysis of Algorithms of Superresolution]. LVII Intern. Sci. readings (V. A. Steklov's memory). Collection of articles of the Intern. Scientific and Practical Conf. 2019. pp 32–37. (In Russ.)
8. Tjulenev S. V., Nechaev Ju. B. *Sravnitel'nyi analiz metodov sverkhrazresheniya v antennoykh reshetkakh* [The Comparative Analysis of Methods of Superresolution in Antenna Array]. Informatics: problems, methodology, technologies. Materials XVII of the Intern. scientific and practical conf. Voronezh, February 9–10, 2017, pp. 456–461. (In Russ.)
9. Manokhin G. O., Geltser A. A., Rogozhnikov E. V. Resolution Gain of the Radar System via Parametric Signal Processing Techniques. Vestnik SibGUTI. 2015, no. 1(29), pp. 15–23. (In Russ.)
10. Lagovsky B. A. Superresolution, Based on Aperture Synthesis with Smart Antennas. Antennas. 2013, no. 6 (193), pp. 9–16. (In Russ.)
11. Chistjakov V. A. *Sravnitel'nyi analiz razreshayushchei sposobnosti metodov sverkhrazresheniya MVDR i MUSIC* [Comparative Analysis of Resolution of Methods of Superresolution MVDR and MUSIC]. Young scientist. 2020, vol. 306, no. 16, pp. 165–168. (In Russ.)
12. Grigorjan D. S., Klimov S. A., Mitrofanov D. G., Prohorkin A. G. The Tracing Radar Signal Processing with Multiple Target Range and Doppler Superresolution. J. Radioengineering. 2013, no. 9, pp. 25–38. (In Russ.)
13. Djurovic I., Zhang Y. Accurate Parameter Estimation of Over-the-Horizon Radar Signals Using RANSAC and MUSIC Algorithm. Progress in Electromagnetics Research. M., 2018, vol. 67, pp. 85–93. doi: 10.2528/PIERM18022004
14. Semjonov S. S. The Hypersonic Shock Systems of New Generation of Use of the Managed Aerial Bombs. Available at: <https://topwar.ru/25460-giperzvukovye-udarnye-sistemy-novogo-pokoleniya-s-ispolzovaniem-upravlyaemyh-aviacionnyh-bomb.html> (accessed 20.11.2021).
15. Ancupov O. I., Ishhuk P. L., Kosjak I. V. Hypersonic Aircraft: is the Danger Real. Aerospace Sphere Journal. 2016, no. 2, pp. 96–105. (In Russ.)
16. Li G.-H., Zhang H.-B., Tang G.-J. Typical Trajectory Characteristics of Hypersonic Gliding Vehicle. J. of Astronautics. 2015, vol. 36, iss. 4, pp. 397–403. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2015.04.005

Information about the author

Vladislav V. Vladimirov, applicant for the degree of Cand. Sci. (Eng.), researcher of the military institute of Mozhaisky MSA, Saint Petersburg. The author of 28 scientific publications. Area of expertise: spatial-temporal signal processing, radar.

Address: Mozhaisky MSA, 42 department (research), 16, General Khrulev St., St Petersburg, 197348 Russia

E-mail: v.vladimirov87@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2984-9692>

Радиолокация и радионавигация

УДК 621.396.96

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-1-36-46>

Влияние разрешающей способности радиолокационных изображений военной техники на точность их классификации глубокой сверточной нейронной сетью

И. Ф. Купряшкин ✉

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", Воронеж, Россия

✉ ifk78@mail.ru

Аннотация

Введение. Сегодня в качестве одного из наиболее перспективных инструментов для решения задачи классификации малоразмерных объектов на радиолокационных изображениях рассматриваются глубокие сверточные нейронные сети. Несмотря на это, в известных работах отсутствуют результаты системного исследования зависимости точности классификации, достигаемой сверточными нейросетями, от такой важной характеристики изображения, как его разрешающая способность.

Цель работы. Определение зависимости точности классификации объектов военной техники глубокой сверточной нейронной сетью от разрешающей способности их радиолокационных изображений.

Материалы и методы. Проектирование восьмислойной сверточной нейронной сети, ее обучение и тестирование осуществлено с использованием библиотеки глубокого обучения Keras и фреймворка Tensorflow 2.0. Для обучения и тестирования использована открытая часть стандартного набора радиолокационных изображений объектов военной техники десяти классов Moving and Stationary Target Acquisition and Recognition. Исходные значения весовых коэффициентов сетей MobileNetV1 и Xception, использованных для сравнительной оценки достигаемой точности классификации, получены по результатам обучения на наборе Imagenet.

Результаты. Точность классификации объектов военной техники быстро снижается с ухудшением разрешающей способности и составляет 97.91, 90.22, 79.13, 52.2 и 23.68 % при разрешении 0.3, 0.6, 0.9, 1.5 и 3 м соответственно. Показано, что использование предобученных сетей с архитектурами MobileNetV1 и Xception не приводит к улучшению точности классификации по сравнению с простой сетью VGG-типа.

Заключение. Эффективное распознавание объектов военной техники при разрешении, хуже чем 1 м, практически невозможно. Точность классификации, демонстрируемая глубокой нейронной сетью, существенно зависит от различия разрешающей способности изображений обучающего и тестового наборов. Значительному повышению устойчивости точности классификации к изменению разрешения способствует обучение на наборе изображений с различным разрешением.

Ключевые слова: глубокая сверточная нейронная сеть, радиолокационное изображение, точность классификации

Для цитирования: Купряшкин И. Ф. Влияние разрешающей способности радиолокационных изображений военной техники на точность их классификации глубокой сверточной нейронной сетью // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 1. С. 36–46. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-36-46

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 24.12.2021; принята к публикации после рецензирования 26.01.2022; опубликована онлайн 28.02.2022

Impact of the Radar Image Resolution of Military Objects on the Accuracy of their Classification by a Deep Convolutional Neural Network

Ivan F. Kupryashkin✉

Military Educational and Scientific Center of the Air Force
"N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy", Voronezh, Russia

✉ ifk78@mail.ru

Abstract

Introduction. Deep convolutional neural networks are considered as one of the most promising tools for classifying small-sized objects on radar images. However, no systemic study has been reported so far on the dependence between the classification accuracy achieved by convolutional neural networks and such an important image characteristic as resolution.

Aim. Determination of a dependence between of the accuracy of classifying military objects by a deep convolutional neural network and the resolution of their radar images.

Materials and methods. An eight-layer convolutional neural network was designed, trained and tested using the Keras library and Tensorflow 2.0 framework. For training and testing, the open part of the standard MSTAR dataset comprising ten classes of military objects radar images was used. The initial weight values of the MobileNetV1 and Xception networks used for a comparative assessment of the achieved classification accuracy were obtained from the training results on the Imagenet.

Results. The accuracy of classifying military objects decreases rapidly along with a deterioration in resolution, amounting to 97.91, 90.22, 79.13, 52.2 and 23.68 % at a resolution of 0.3, 0.6, 0.9, 1.5 and 3 m, respectively. It is shown that the use of pre-trained MobileNetV1 and Xception networks does not lead to an improvement in the classification accuracy compared to a simple VGG-type network.

Conclusion. Effective recognition of military objects at a resolution worse than one meter is practically impossible. The classification accuracy of deep neural networks depends significantly on the difference in the image resolution of the training and test sets. A significant increase in the resistance of the classification accuracy to changes in the resolution can be achieved by training on a set of images with different resolutions.

Keywords: deep convolutional neural network, radar image, classification accuracy

For citation: Kupryashkin I. F. Impact of the Radar Image Resolution of Military Objects on the Accuracy of their Classification by a Deep Convolutional Neural Network. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 1, pp. 36–46. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-36-46

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

Submitted 24.12.2021; accepted 26.01.2022; published online 28.02.2022

Введение. В настоящее время глубокие сверточные нейронные сети (ГСНС) являются одним из наиболее перспективных инструментов для решения задач поиска и классификации объектов на радиолокационных изображениях (РЛИ) [1–13]. Это обусловлено тем, что результаты сравнения точности классификации объектов с помощью алгоритмов, рассматриваемых как традиционные (K-ближайших соседей (K-Neighbor)), опорных векторов (SVM), множества решающих деревьев (Random Forest, AdaBoost, CART и др.) и алгоритмов, построенных на основе ГСНС, демонстрируют уверенное преимущество последних даже при отсутствии предобработки изображений [2], [14–16], а также их меньшую чувстви-

тельность к случайным смещениям или поворотам изображения.

Несмотря на значительный объем уже выполненных исследований в этой сравнительно новой области, в известных публикациях практически не отражены вопросы влияния изменения разрешающей способности РЛИ на результаты работы ГСНС. В то же время естественно ожидать, что ГСНС, обученная классифицировать объекты при одном разрешении, может решать эту задачу гораздо хуже при его изменении даже при аналогичных пространственных условиях радиолокационной съемки и для тех же самых объектов.

В связи с этим целью работы является определение зависимости точности классификации объ-

ектов глубокой сверточной нейронной сетью от разрешения их радиолокационных изображений.

Методы. В качестве исходных данных использован набор MSTAR (Moving and Stationary Target Acquisition and Recognition) [17], являющийся базовым для создания и изучения алгоритмов распознавания объектов на РЛИ. Используемая в описываемой работе открытая часть набора MSTAR включает РЛИ десяти образцов военной техники, полученные по результатам съемки РЛС Х-диапазона. Заявленное исходное разрешение составляет около 0.3 м. Примеры оптических и радиолокационных изображений объектов набора MSTAR приведены на рис. 1.

Из всех имеющихся изображений сформированы обучающий, проверочный и тестовый набо-

ры, сведения об объемах (количестве изображений) которых приведены в табл. 1. Изображения объектов обучающих и проверочных наборов получены при съемке с углом визирования 17°, тестовых наборов – 15°. При разработке и исследовании алгоритмов распознавания объектов на РЛИ на базе набора MSTAR подобное распределение близко соответствует стандартному, которое в иностранной литературе обозначается как SOC (Standard Operating Conditions) [3].

Общее количество изображений обучающего, проверочного и тестового наборов составляет 1923, 891 и 2503 соответственно.

Каждое изображение представлено в форме массива комплексных отсчетов $\dot{I}$, причем его размерность для разных классов объектов раз-

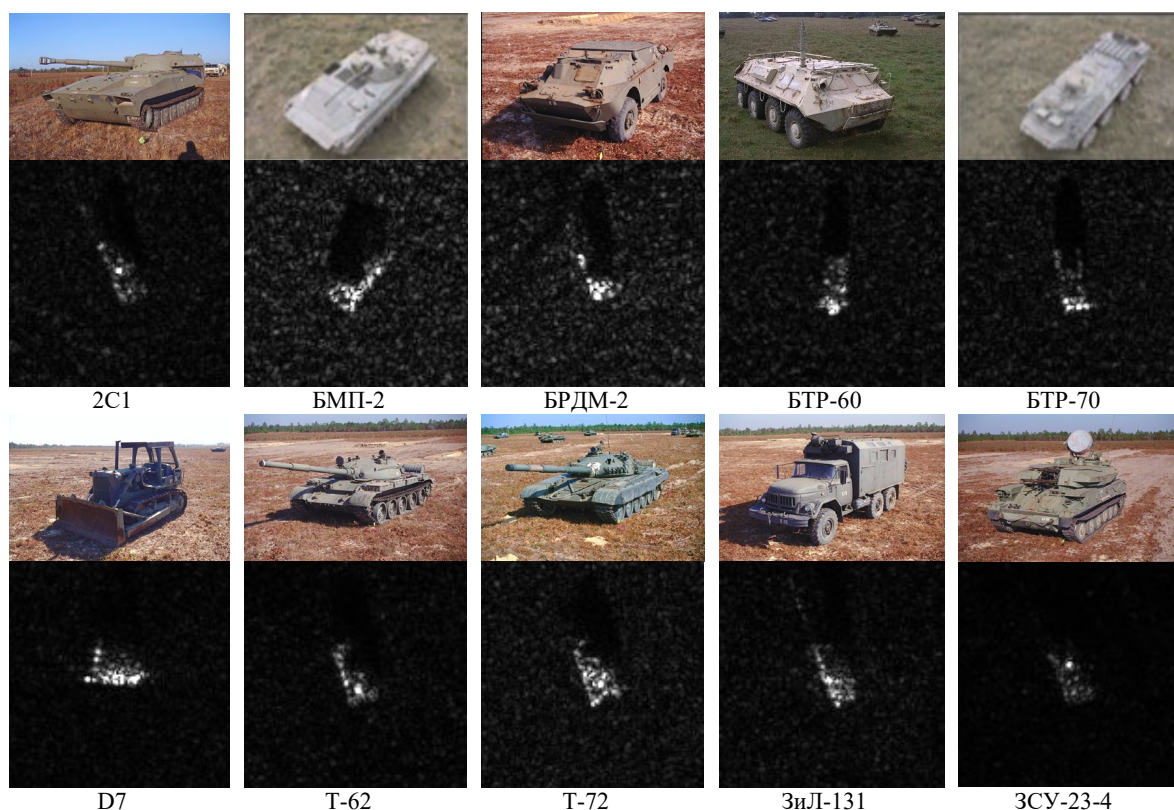


Рис. 1. Оптические и радиолокационные изображения объектов набора MSTAR

Fig. 1. Optical and radar images of MSTAR objects

Табл. 1. Характеристики обучающих, проверочных и тестовых наборов

Tab. 1. Characteristics of training, validation and test sets

Набор	Объект	Объем	Объект	Объем	Объект	Объем	Объект	Объем	Объект	Объем
Обучающий	2C1	209	D7	200	БРДМ-2	209	БТР-70	163	Зил-131	200
Проверочный		90		99		89		70		99
Тестовый		274		274		274		196		274
Обучающий	БМП-2	163	T-62	200	БТР-60	179	T-72	200	ЗСУ-23-4	200
Проверочный		70		99		77		79		99
Тестовый		195		273		195		274		274

лична. Для исключения влияния фона местности вычисленные амплитуды отсчетов исходных комплексных изображений сравниваются с порогом

$$I_{ij} = \begin{cases} \dot{I}_{ij}, & |\dot{I}_{ij}| \geq I_0; \\ 0, & |\dot{I}_{ij}| < I_0, \end{cases} \quad (1)$$

где порог $I_0 = I_{\Phi_n}$ определяется как значение n -го элемента упорядоченной по возрастанию выборки фоновых отсчетов $I_{\Phi_{(i-1)N_l+j}} = |\dot{I}_{ij}|$ из области изображения, заведомо не включающей отсчеты отметки объекта и его радиолокационной тени; $i \in [1; N_r]$, $j \in [1; N_l]$; N_r и N_l – количество строк и столбцов массива $\dot{I}$ соответственно.

В качестве такой области принимаются участки изображения с интервалами индексов $i \in [1; N_r]$, $j \in [1; N_\Phi]$ и $i \in [1; N_r]$, $j \in [N_l - N_\Phi + 1; N_l]$ (заштрихованные области на рис. 2). Значение индекса определяется в соответствии с правилом

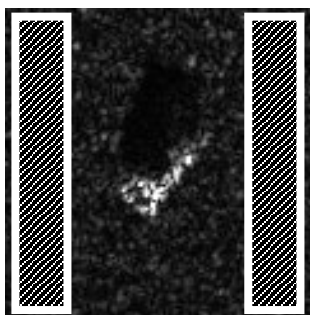


Рис. 2. Области фоновых отсчетов
Fig. 2. Areas of background samples

$n = \text{int}\{2pN_rN_\Phi\}$, где N_Φ – количество столбцов массива $\dot{I}$, выделяемых при формировании выборки фоновых отсчетов; $p \in [0; 1]$ – вероятность превышения порога I_0 амплитудой фоновых отсчета, т. е. вероятность ложной тревоги.

Так как при отсутствии фона исходная размерность изображений от 128×128 отсчетов и более с точки зрения классификации объектов является избыточной, на следующем этапе подготовки данных она понижается до 44×44 за счет осуществления операции вида

$$\dot{I}_{ij} = \dot{I}_{i+\text{int}\{N_r/2-N/2\}, j+\text{int}\{N_l/2-N/2\}}, \quad (2)$$

где $i = \overline{1, N}$ и $j = \overline{1, N}$ при $N = 44$.

Результат пороговой обработки (1) и понижения размерности (2) комплексного изображения преобразуется в целочисленный 8-битный формат в соответствии с правилом

$$I_{ij} = \begin{cases} \bar{I}_{ij}, & \bar{I}_{ij} \leq 2^8; \\ 2^8, & \bar{I}_{ij} > 2^8, \end{cases}$$

где $\bar{I}_{ij} = \text{int}\left\{2^9 \times \frac{|\dot{I}_{ij}| - I_{\min}}{I_{\max}}\right\}$; $I_{\min}$ и $I_{\max}$ – минимальная и максимальная амплитуды отсчетов массива $\dot{I}$ соответственно.

Перед подачей на вход нейронной сети целочисленные значения диапазона $[0; 255]$ преобразуются в вещественные диапазона $[0; 1]$ делением на 255.

Примеры изображений подготовленного набора при $N_\Phi = 30$ и $p = 0.01$ приведены на рис. 3.

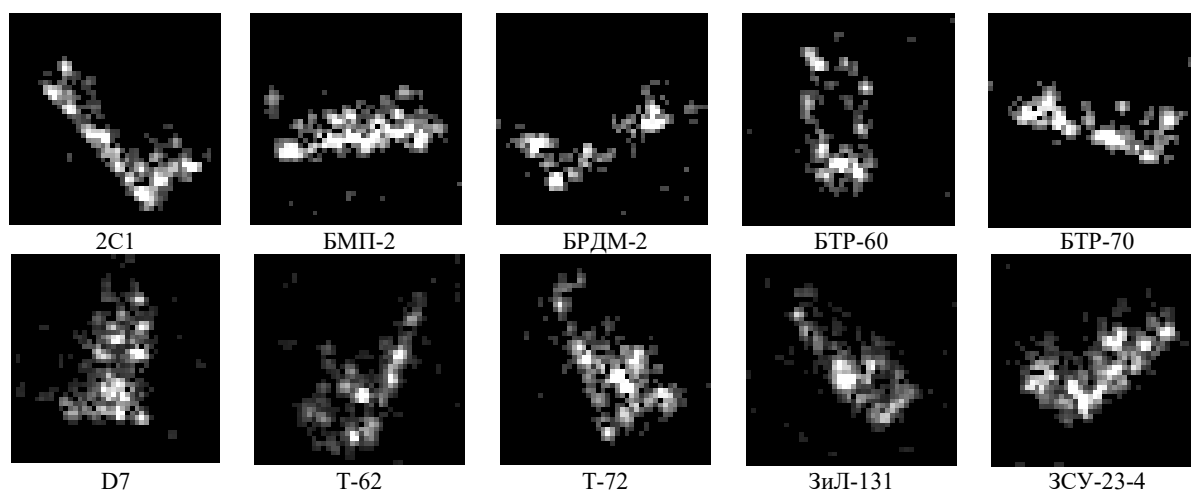


Рис. 3. Примеры изображений набора данных с подавленными фоновыми отсчетами

Fig. 3. Examples of images with suppressed background pixels

Разработка и обучение сети осуществлялись с использованием библиотеки глубокого обучения Keras [18] и фреймворка TensorFlow 2.0 [19].

Архитектура сети, для которой далее в статье принято обозначение C-CNN (Custom CNN), показана на рис. 4 и включает последовательности четырех пар сверточных слоев (Convolution Layers) с одинаковыми ядрами 3×3 и единичным шагом свертки. После каждой пары включены слои подвыборки (MaxPooling) 2×2 . Первая пара сверточных слоев включает по 32 фильтра, вторая – по 64, третья – по 128 и четвертая – по 256. Полносвязный классификатор включает входной слой (Dense) на 4096 входов и 256 выходов, слой 50-процентного прореживания (Dropout) и выходной слой с 10 выходами по числу классов. В качестве функции активации сверточных слоев и входного слоя классификатора используется кусочно-линейная (ReLU). Для описанной архитектуры количество настраиваемых параметров сети составляет 2 223 082.

При обучении используется адаптивный алгоритм Adam с параметром скорости обучения 10^{-4} (по умолчанию это значение составляет 10^{-3}),

обучение осуществляется в течение двухсот эпох. В качестве функции потерь применена перекрестная энтропия [19]. Общее время обучения с использованием GPU (GeForce GTX1660SUPER) составляет около 25 мин, т. е. примерно по 7 с на эпоху. В качестве дополнительного приема предотвращения переобучения применяется расширение данных (augmentation) смещением каждого изображения по вертикали и горизонтали на случайное число пикселей от одного до пяти и двукратной подачей обучающего набора на вход сети в течение каждой эпохи. По результатам классификации изображений тестового набора сеть C-CNN показала точность 97.91 %, т. е. неверно классифицировала 52 изображения из 2503.

При выборе архитектуры сети осуществлялся перебор различных вариантов сочетания гиперпараметров (количества и размерности сверточных слоев, типов функций активации, включение слоев пакетной нормализации (BatchNormalization), слоев прореживания (Dropout) на различных этапах и др.), а также сравнение скорости и качества обучения при различных способах инициализации весов, типах и параметрах оптимизаторов (Adam, RMSProp, Adadelta). В целом, к заметному улучшению точности классификации включение дополнительных слоев или этапов обработки не привело.

Несмотря на то, что сеть C-CNN представляет собой классическую сверточную сеть VGG-типа [20], достигнутая точность классификации 97.91 % довольно высока. Тем не менее, на сегодняшний день существует значительное разнообразие более сложных архитектур, включающих bottleneck-слои (сети типа Inception), residual-блоки (сети типа ResNet), а также ряд других решений и их сочетаний.

Как правило, эти сети обучают и тестируют на наборе данных цветных изображений ImageNet, используемом в проекте ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC), в рамках которого различные программные продукты ежегодно соревнуются в классификации и распознавании объектов и сцен в базе данных ImageNet¹.

Для проверки того, повлияет ли существенным образом выбор архитектуры сети на результаты классификации изображений с разным раз-

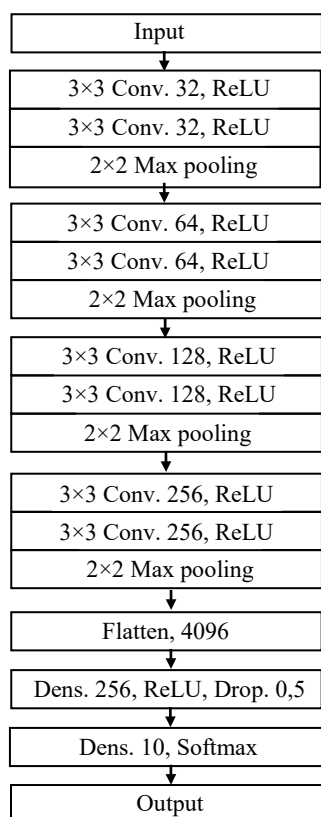


Рис. 4. Архитектура сети C-CNN
Fig. 4. C-CNN network architecture

¹ По состоянию на декабрь 2021 г. первенство в соревновании ILSVRC удерживает сеть CoAtNet-7 более чем с двумя миллиардами настраиваемых параметров.

решением, с использованием техники переноса обучения (Transfer Learning) [18, 21] дополнительно дообучены сети Xception [22] и MobileNetV1 [23]. Полносвязные классификаторы этих сетей заменены на собственные, включающие входной полносвязный слой на 512 выходов, слой 50 %-го прореживания и выходной полносвязный слой на 10 выходов по числу классов. При дообучении использован оптимизатор Adam с параметром скорости обучения 10^{-5} . С целью обеспечения равных условий обучения и корректности последующего сравнения результатов входные изображения перед подачей на вход сетей (C-CNN в том числе) приведены к размерности 128×128 , так как она является минимальной для сети Xception. Наилучшая точность на тестовом наборе для сети на основе архитектуры Xception составляет 97.36 %, MobileNetV1 – 96.47 %.

В целом, использование предобученных сетей с большим количеством слоев и более сложной архитектурой при исходном разрешении РЛИ около 0.3 м заметного улучшения точности не дало.

Подготовка наборов РЛИ с ухудшенным разрешением осуществляется фильтрацией изображений после пороговой обработки (1) и снижения их размерности (2) как

$$I_{ij} = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N |I_{mn}| G(m-i, n-j),$$

где $G(m, n) = \exp\left[-\frac{(m^2 + n^2)}{2k_r^2}\right]$; k_r – коэффициент, характеризующий, во сколько раз в результате фильтрации ухудшается разрешение изображения.

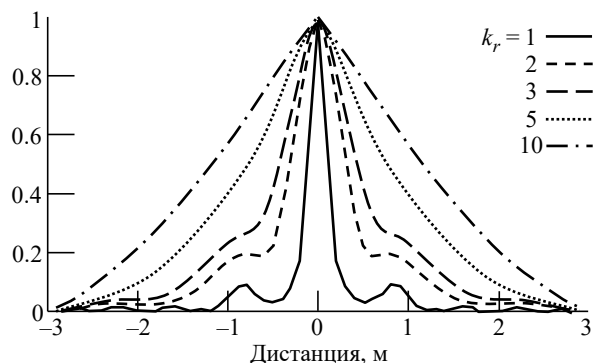


Рис. 5. Сечения нормированной автокорреляционной функции изображения при различных k_r

Fig. 5. Image normalized autocorrelation function cross sections at different k_r

В качестве меры разрешающей способности принята ширина автокорреляционной функции изображения по уровню 0.5 от максимума. На рис. 5 показаны сечения нормированной автокорреляционной функции одного и того же изображения по одной из координат, иллюстрирующие ее расширение при $k_r = 1, 2, 3, 5$ и 10.

Примеры изображений объектов с исходным разрешением 0.3 м и с ухудшенным в 2 (0.6 м), 3 (0.9 м), 5 (1.5 м) и 10 (3 м) раз показаны на рис. 6.

Обучение сетей C-CNN, MobileNetV1 и Xception проведено в течение 200, 150 и 100 эпох соответственно. Параметр скорости обучения оптимизатора Adam принимался равным 10^{-4} в случае C-CNN и 10^{-5} – в случаях MobileNetV1 и Xception. Зависимости, иллюстрирующие процесс обучения сети C-CNN на различных наборах изображений, приведены на рис. 7.

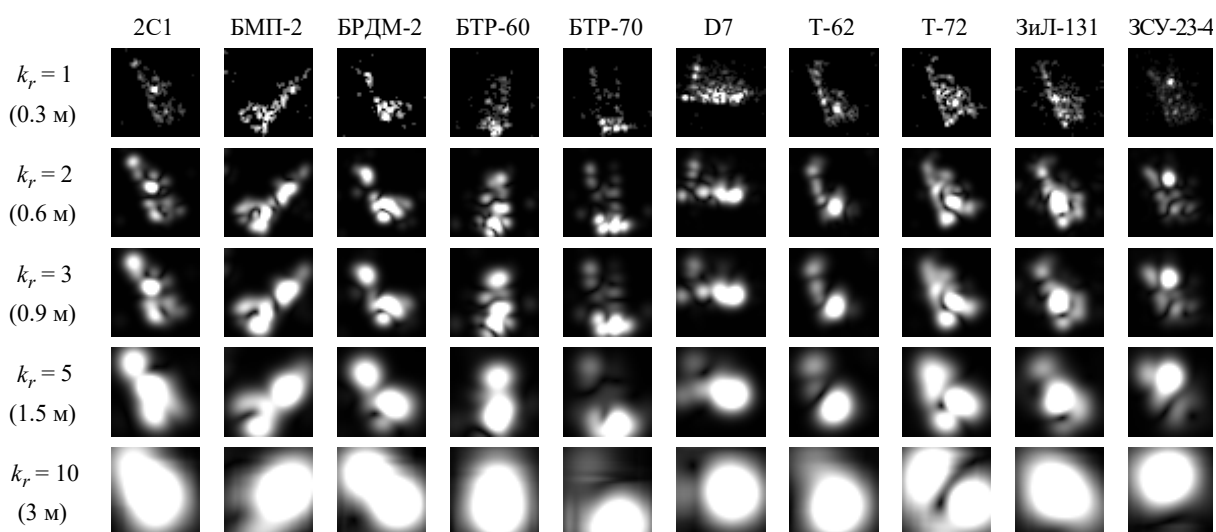


Рис. 6. Примеры изображений наборов с различным разрешением

Fig. 6. Examples of image sets with different resolutions

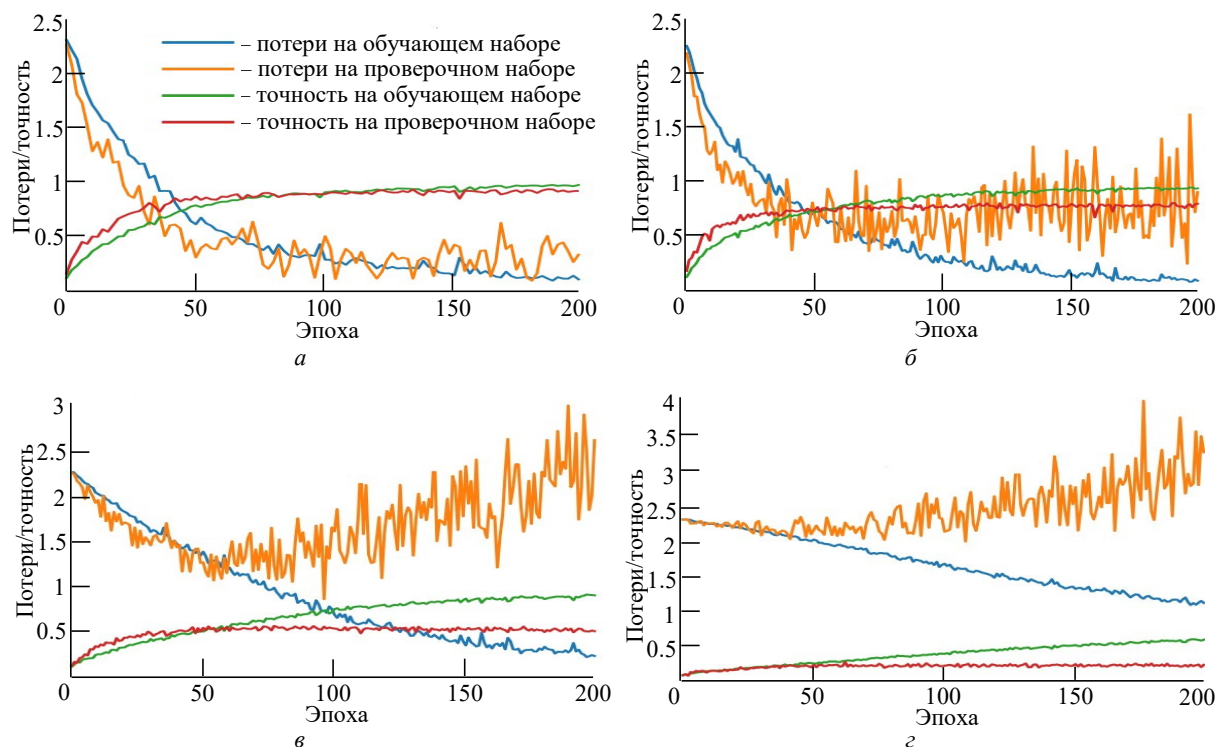


Рис. 7. Характеристики процесса обучения сети C-CNN при различном разрешении изображений:

$a - k_r = 2$; $b - k_r = 3$; $v - k_r = 5$; $z - k_r = 10$

Fig. 7. Characteristics of the C-CNN network training process at different image resolution:

$a - k_r = 2$; $b - k_r = 3$; $v - k_r = 5$; $z - k_r = 10$

Результаты. Характерной чертой является все более раннее проявление признаков переобучения сети по мере ухудшения разрешения набора данных (прекращение роста точности и рост потерь на проверочном наборе при непрерывных улучшении точности и снижении потерь на обучающем). Наилучшие точности на тестовом наборе продемонстрировали сети C-CNN с весами, настроенными на 172-й ($k_r = 2$; 89.82 %), 141-й ($k_r = 3$; 79.13 %), 129-й ($k_r = 5$; 52.2 %) и 113-й ($k_r = 10$; 23.68 %) эпохах. Сеть MobileNetV1 показала наилучшие точности на 126-й ($k_r = 2$; 90.22 %), 95-й ($k_r = 3$; 66.07 %), 145-й ($k_r = 5$; 40.83 %) и 113-й ($k_r = 150$; 20.99 %) эпохах, сеть Xception – на 33-й ($k_r = 2$; 86.54 %), 95-й ($k_r = 3$; 69.47 %), 94-й ($k_r = 5$; 44.91 %) и 100-й ($k_r = 10$; 21.59 %) эпохах соответственно.

Сравнительная диаграмма достигнутой максимальной точности классификации при различной разрешающей способности приведена на рис. 8.

Полные результаты, включающие тестирование всех сетей на всех наборах с различным разрешением, приведены в табл. 2.

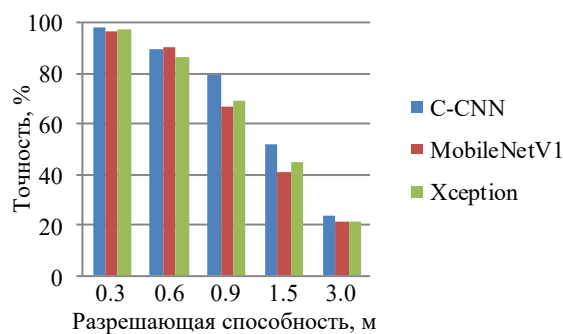


Рис. 8. Сравнительная диаграмма точности классификации при различной разрешающей способности

Fig. 8. Comparative diagram of classification accuracy at different resolution

Результаты тестирования сетей в форме графических зависимостей приведены на рис. 9, $a-v$. Из их анализа следует, что чувствительность к изменению разрешения тестового набора является максимальной для сетей, обученных на наборах с высоким разрешением, и снижается по мере его ухудшения с одновременным падением точности.

С целью анализа возможности расширения диапазона разрешений изображений, эффективно классифицируемых сетью C-CNN, были сформированы обучающий, проверочный и тестовый наборы из 4063, 1904 и 5249 изображений соответственно. Наборы изображений каждого класса

Табл. 2. Результаты тестирования сетей на наборах с различным разрешением

Tab. 2. Results of network testing on image sets with different resolutions

Разрешение обучающего набора, м	Разрешение тестового набора, м				
	0.3	0.6	0.9	1.5	3
C-CNN					
0.3	97.91 %	13.22 %	10.93 %	10.93 %	10.97 %
0.6	14.34 %	89.82 %	31.61 %	13.9 %	11.54 %
0.9	16.39 %	52 %	79.13 %	19.27 %	10.86 %
1.5	21.43 %	28.73 %	37.62 %	52.2 %	10.69 %
3	12.62 %	15.3 %	15.18 %	16.27 %	23.68 %
MobileNetV1					
0.3	96.47 %	17.63 %	14.02 %	11.86 %	8.61 %
0.6	16.38 %	90.22 %	39.3 %	19.51 %	12.02 %
0.9	11.06 %	36.05 %	66.07 %	23.88 %	12.5 %
1.5	12.1 %	20.75 %	31.61 %	40.83 %	12.46 %
3	11.26 %	11.26 %	10.62 %	13.02 %	20.99 %
Xception					
0.3	97.36 %	23.92 %	15.76 %	14.46 %	10.89 %
0.6	19.51 %	86.54 %	44.99 %	18.67 %	10.77 %
0.9	11.78 %	48.19 %	69.47 %	24.32 %	11.09 %
1.5	13.54 %	23.12 %	33.77 %	44.91 %	13.14 %
3	9.13 %	10.49 %	9.86 %	12.78 %	21.59 %

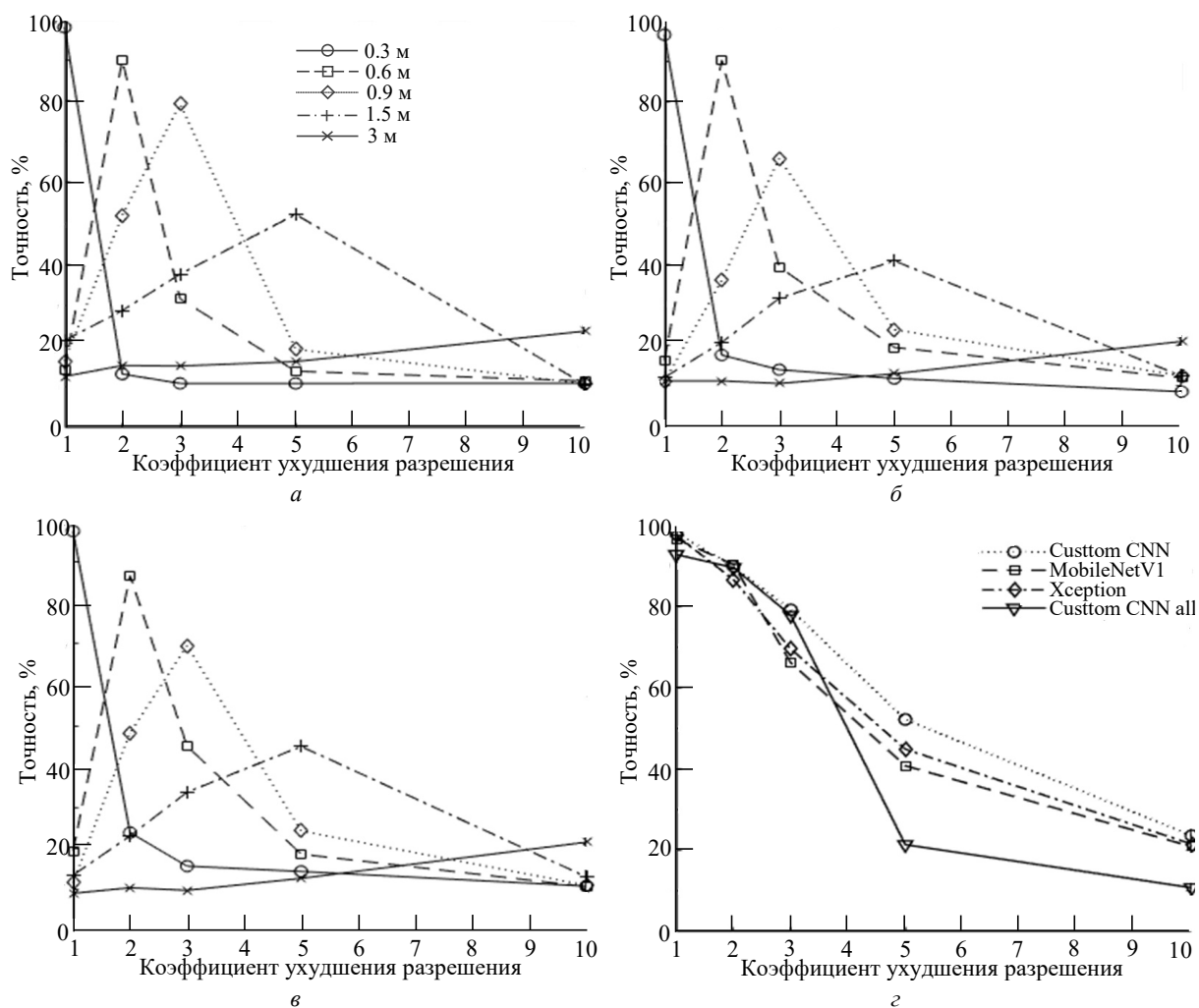


Рис. 9. Точности классификации, достигнутые на тестовых наборах с различным разрешением: а – C-CNN; б – MobileNetV1; в – Xception; г – на смешанном наборе с различным разрешением

Fig. 9. Classification accuracy on image test sets with different resolutions: а – C-CNN; б – MobileNetV1; в – Xception; г – on a mixed set with different resolutions

Табл. 3. Результаты тестирования сети C-CNN на наборах с различным разрешением

Tab. 3. Results of testing the CNN network on image sets with different resolutions

Разрешение тестового набора, м					
Случайное (0.3; 0.6; 0.9)	0.3	0.6	0.9	1.5	3
87.41	92.70	89.46	77.76	21.47	10.89

включали случайное количество изображений с исходным, ухудшенным в 2 и в 3 раза разрешением. Результаты тестирования сети C-CNN на всех наборах данных приведены в табл. 3.

На рис. 9, 2 приведены зависимости максимальных значений точности классификации, достигнутые различными сетями, от разрешающей способности радиолокационных изображений.

В целом, несмотря на некоторое ухудшение точности с 97.91 до 92.7 % при исходном разрешении, при его двух- и трехкратном ухудшении сеть продемонстрировала приблизительно те же точностные характеристики, что и сети, обученные только на соответствующих наборах данных.

Заключение. Таким образом, общим выводом является быстрое ухудшение точности распознавания объектов военной техники с ухудшением разрешающей способности их изображений.

Так, при разрешении 0.6 м наилучшая точность составила 90.22 % (MobileNetV1), 0.9 м – 79.13 % (C-CNN), 1.5 м – 52.2 % (C-CNN), 3 м – 23.68 % (C-CNN). Другими словами, эффективное распознавание объектов с точностью до типа при разрешении, хуже чем 1 м, практически невозможно даже при использовании одного из наиболее совершенных из существующих инструментов, а именно ГСНС. Существенно повысить устойчивость точности к изменению разрешения позволило обучение сети на наборе изображений с различным разрешением. Полученные оценки могут служить опорными при оценке возможностей распознавания объектов на РЛИ в целом, так как вряд ли какие-либо из существующих алгоритмов способны показать более высокие результаты по сравнению с ГСНС в обозримой перспективе.

Список литературы

1. Deep Learning Meets SAR / X. Zhu, S. Montazeri, M. Ali, Yu. Hua, Yu. Wang, L. Mou, Yi. Shi, F. Xu, R. Bamler. URL: <https://arxiv.org/pdf/2006.10027.pdf> (дата обращения 20.12.2021)
2. Application of Deep-Learning Algorithms to MSTAR Data / H. H. Wang, S. Chen, F. Xu, Y.-Q. Jin // IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS), Milan, Italy, 26–31 July 2015. IEEE, 2015. P. 3743–3745. doi: 10.1109/IGARSS.2015.7326637
3. Target Classification Using the Deep Convolutional Networks for SAR Images / S. Chen, H. Wang, F. Xu, Y.-Q. Jin // IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing. 2016. Vol. 54, № 8. P. 4806–4817. doi: 10.1109/TGRS.2016.2551720
4. Deep Learning for SAR Image Classification / H. Anas, H. Majdoulayne, A. Chaimae, S. M. Nabil // Intelligent Systems and Applications. Springer, Cham., 2020. P. 890–898. doi: 10.1007/978-3-030-29516-5_67
5. Chen S., Wang H. SAR Target Recognition Based on Deep Learning // Intern. Conf. on Data Science and Advanced Analytics (DSAA). Shanghai, China, 30 Oct. – 1 Nov. 2014. IEEE, 2014. P. 541–547. doi: 10.1109/DSAA.2014.7058124
6. Coman C., Thaens R. A Deep Learning SAR Target Classification Experiment on MSTAR Dataset // 19th Intern. Radar Symp. (IRS), Bonn, Germany, 20–22 June 2018. IEEE, 2018. P. 1–6. doi: 10.23919/IRS.2018.8448048
7. Furukawa H. Deep Learning for End-to-End Automatic Target Recognition from Synthetic Aperture Radar Imagery. URL: <https://arxiv.org/pdf/1801.08558.pdf> (дата обращения 20.12.2021)
8. Profeta A., Rodriguez A., Clouse H. S. Convolutional Neural Networks for Synthetic Aperture Radar Classification // Proc. SPIE 9843, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XXIII. 2016. 98430M. doi: 10.1117/12.2225934
9. Wang Z., Xu X. Efficient deep convolutional neural networks using CReLU for ATR with limited SAR images // The J. of Engineering. 2019. Vol. 2019, № 21. P. 7615–7618. doi: 10.1049/joe.2019.0567
10. Wilmski M., Kreucher C., Lauer J. Modern Approaches in Deep Learning for SAR ATR // Proc. SPIE 9843, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XXIII. 2016. 98430N. doi: 10.1117/12.2220290
11. A Novel Convolutional Neural Network Architecture for SAR Target Recognition / Yi. Xie, W. Dai, Z. Hu, Yi. Liu, C. Li, X. Pu // J. of Sensors. 2019. Art. 1246548. doi: 10.1155/2019/1246548
12. Xinyan F., Weigang Z. Research on SAR Image Target Recognition Based on Convolutional Neural Network // J. of Physics: Conf. Series. 2019. Ser. 1213. 042019. doi: 10.1088/1742-6596/1213/4/042019
13. A Deep Learning Fusion Recognition Method Based On SAR Image Data / J. Zhai, G. Dong, F. Chen, X. Xie, C. Qi, L. Li // Procedia Computer Science. 2019. Vol. 147. P. 533–541. doi: 10.1016/j.procs.2019.01.229
14. A New Algorithm of SAR Image Target Recognition based on Improved Deep Convolutional Neural Network / F. Gao, T. Huang, J. Sun, J. Wang, A. Hussain, E. Yang // Cognitive Computation. 2019. Vol. 11. P. 809–824. doi: 10.1007/s12559-018-9563-z

15. Malmgren-Hansen D., Engholm R., Østergaard Pedersen M. Training Convolutional Neural Networks for Translational Invariance on SAR ATR // Proc. of EUSAR 2016: 11th European Conf. on Synthetic Aperture Radar, Hamburg, Germany, 6–9 Jun 2016. IEEE, 2016. P. 459–462.

16. Бородин А. А., Мясников В. В. Сравнение алгоритмов классификации радарных изображений при различных методах предобработки на примере базы MSTAR // Сб. тр. IV Междунар. конф. и молодежной школы "Информационные технологии и нанотехнологии" (ИТНТ-2018). Самара: Новая техника, 2018. С. 586–594.

17. Kechagias-Stamatis O., Aouf N. Automatic Target Recognition on Synthetic Aperture Radar Imagery: A Survey. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2007/2007.02106.pdf> (дата обращения 20.12.2021)

18. Шолле Ф. Глубокое обучение на Python. СПб.:

Питер, 2018. 400 с.

19. Николенко С., Кадури А., Архангельская Е. Глубокое обучение. СПб.: Питер, 2018. 480 с.

20. Simonyan K., Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks For Large-Scale Image Recognition. URL: <https://arxiv.org/pdf/1409.1556.pdf> (дата обращения 20.12.2021)

21. Huang Z., Pan Z., Lei B. What, Where and How to Transfer in SAR Target Recognition Based on Deep CNNs. URL: <https://arxiv.org/pdf/1906.01379.pdf> (дата обращения 20.12.2021)

22. Chollet F. Xception: Deep Learning with Depth-wise Separable Convolutions. URL: <https://arxiv.org/pdf/1610.02357.pdf> (дата обращения 20.12.2021)

23. MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications / A. G. Howard, M. Zhu, B. Chen, D. Kalenichenko. URL: <https://arxiv.org/pdf/1704.04861.pdf> (дата обращения 20.12.2021)

Информация об авторе

Купряшкин Иван Федорович – доктор технических наук (2017), доцент (2011), начальник кафедры боевого применения средств РЭБ (с воздушно-космическими системами управления и наводящимся оружием) Военного учебно-научного центра военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина". Автор более 100 научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокационные системы; системы радиоэлектронного противодействия радиолокационным системам. Адрес: Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", ул. Старых Большевиков, д. 54 А, Воронеж, 394064, Россия E-mail: ifk78@mail.ru

References

1. Zhu X., Montazeri S., Ali M., Hua Yu., Wang Yu., Mou L., Shi Yi., Xu F., Bamler R. Deep Learning Meets SAR. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2006.10027.pdf> (accessed 20.12.2021)

2. Wang H. H., Chen S., Xu F., Jin Y.-Q. Application of Deep-Learning Algorithms to MSTAR. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS), Milan, Italy, 26–31 July 2015. IEEE, 2015, pp. 3743–3745. doi: 10.1109/IGARSS.2015.7326637

3. Chen S., Wang H., Xu F., Jin Y.-Q. Target Classification Using the Deep Convolutional Networks for SAR Images. IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing. 2016, vol. 54, no. 8, pp. 4806–4817. doi: 10.1109/TGRS.2016.2551720

4. Anas H., Majdoulayne H., Chaimae A., Nabil S. M. Deep Learning for SAR Image. Intelligent Systems and Applications. Springer, Cham., 2020, pp. 890–898. doi: 10.1007/978-3-030-29516-5_67

5. Chen S., Wang H. SAR Target Recognition Based on Deep Learning. Intern. Conf. on Data Science and Advanced Analytics (DSAA). Shanghai, China, 30 Oct. – 1 Nov. 2014. IEEE, 2014, pp. 541–547. doi: 10.1109/DSAA.2014.7058124

6. Coman C., Thaens R. A Deep Learning SAR Target Classification Experiment on MSTAR Dataset. 19th Intern. Radar Symp. (IRS). Bonn, Germany, 20–22 June 2018. IEEE, 2018, pp. 1–6. doi: 10.23919/IRS.2018.8448048

7. Furukawa H. Deep Learning for End-to-End Automatic Target Recognition from Synthetic Aperture Radar Imagery. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1801.08558.pdf> (accessed 20.12.2021)

8. Profeta A., Rodriguez A., Clouse H. S. Convolutional Neural Networks for Synthetic Aperture Radar Classification. Proc. SPIE 9843, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XXIII. 2016, 98430M. doi: 10.1117/12.2225934

9. Wang Z., Xu X. Efficient Deep Convolutional Neural Networks Using CReLU for ATR with Limited SAR Images. The J. of Engineering. 2019, vol. 2019, no. 21, pp. 7615–7618. doi: 10.1049/joe.2019.0567

10. Wilmski M., Kreucher C., Lauer J. Modern Approaches in Deep Learning for SAR ATR. Proc. SPIE 9843, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XXIII. 2016, 98430N. doi: 10.1117/12.2220290

11. Xie Yi., Dai W., Hu Z., Liu Yi., Li C., Pu X. A Novel Convolutional Neural Network Architecture for SAR Target Recognition. J. of Sensors. 2019, art. 1246548. doi: 10.1155/2019/1246548

12. Xinyan F., Weigang Z. Research on SAR Image Target Recognition Based on Convolutional Neural Network. J. of Physics: Conf. Series. 2019, ser. 1213, 042019. doi: 10.1088/1742-6596/1213/4/042019

13. Zhai J., Dong G., Chen F., Xie X., Qi C., Li L. A Deep Learning Fusion Recognition Method Based On SAR Im-

age Data. Procedia Computer Science. 2019, vol. 147, pp. 533–541. doi: 10.1016/j.procs.2019.01.229

14. Gao F., Huang T., Sun J., Wang J., Hussain A., Yang E. A New Algorithm of SAR Image Target Recognition based on Improved Deep Convolutional Neural Network. Cognitive Computation. 2019, vol. 11, pp. 809–824. doi: 10.1007/s12559-018-9563-z

15. Malmgren-Hansen D., Engholm R., Østergaard Pedersen M. Training Convolutional Neural Networks for Translational Invariance on SAR ATR. Proc. of EUSAR 2016: 11th European Conf. on Synthetic Aperture Radar, Hamburg, Germany, 6–9 Jun 2016. IEEE, 2016, pp. 459–462.

16. Borodinov A. A., Myasnikov V. V. Comparison of Radar Image Classification Algorithms for Various Pre-processing Methods Based on MSTAR Data. Proc. of the IV Intern. Conf. and Youth School "Information Technology and Nanotechnology" (ITNT-2018). Samara, New Equipment, 2018, pp. 586–594. (In Russ.)

17. Kechagias-Stamatis O., Aouf N. Automatic Target Recognition on Synthetic Aperture Radar Imagery: A Survey. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2007/2007.02106.pdf> (accessed 20.12.2021)

18. Chollet F. Deep Learning with Python. NY, Manning, 2017, 384 p.

19. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangel'skaya E. *Glubokoe obuchenie* [Deep Learning]. SPb., Piter, 2018, 480 p. (In Russ.).

20. Simonyan K., Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks For Large-Scale Image Recognition. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1409.1556.pdf> (accessed 20.12.2021)

21. Huang Z., Pan Z., Lei B. What, Where and How to Transfer in SAR Target Recognition Based on Deep CNNs. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1906.01379.pdf> (accessed 20.12.2021)

22. Chollet F. Xception: Deep Learning with Depth-wise Separable Convolutions. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1610.02357.pdf> (accessed 20.12.2021).

23. Howard A.G., Zhu M., Chen B., Kalenichenko D. MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1704.04861.pdf> (accessed 20.12.2021)

Information about the author

Ivan F. Kupryashkin – Dr Sci. (Eng.) (2017), Associate Professor (2011), Head of the Department of Combat Use of Electronic Warfare Systems (with Aerospace Control Systems and Guided Weapons) of Military Educational and Scientific Center of the Air Force "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy". The author of more than 100 publications. Area of expertise: radar systems; systems of radio-electronic counteraction to radar. Address: Military Educational and Scientific Center of the Air Force "N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy", 54 A, Sarykh Bolshevikov Str., Voronezh 394064, Russia
E-mail: ifk78@mail.ru

Микро- и наноэлектроника

УДК 47.09

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-1-47-53>

**Особенности применения сорбционного анализа
для исследования различных наноматериалов электроники
в зависимости от состава и технологических условий получения**

А. С. Леньшин¹, Е. В. Мараева^{2✉}

¹ Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ jenvmar@mail.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время сорбционные методы анализа, включая метод тепловой десорбции инертных газов, широко применяются для характеристики параметров пористой структуры наноматериалов широкого спектра функционального назначения. Тепловая десорбция азота относится к группе неразрушающих методик, обеспечивающих экспресс-анализ таких параметров наноматериалов, как удельная поверхность, средний размер частиц, распределение мезопор по размерам, наличие или отсутствие микропор в системе. В данной статье в качестве объектов исследования выбраны порошки мезопористого кремния и гидроксипатита кальция. Наноструктуры на основе мезо- и нанопористого кремния представляют интерес при реализации фильтров для систем волоконно-оптической связи, поскольку современные интерференционные оптические фильтры громоздки в использовании и дороги. Гидроксипатит потенциально обеспечивает высокую коррозионную стойкость и не токсичен для окружающей среды. Антикоррозионные покрытия на его основе имеют решающее значение для практического применения магниевых сплавов, которые используются для уменьшения массы транспортных средств, самолетов, корпусов электроники.

Цель работы. Рассмотрение особенностей применения метода тепловой десорбции инертных газов, в частности азота, для исследования параметров пористой структуры наноматериалов различного состава на примере мезопористого кремния и гидроксипатита.

Материалы и методы. Применение метода тепловой десорбции инертных газов и капиллярной конденсации для исследования параметров пористой структуры порошков гидроксипатита и пористого кремния. Метод тепловой десорбции азота реализован с помощью прибора Сорби МС, оснащенного станцией пробоподготовки Сорби Преп.

Результаты. Предложены рекомендации по выбору массы материала-адсорбента, требуемой для исследования, выбору условий пробоподготовки и диапазона изменения относительного парциального давления газа-адсорбата. Установлено, что выбранные типы образцов характеризуются отсутствием системы микропор в структуре. Проанализирована зависимость удельной поверхности порошков гидроксипатита и параметров его мезопористой структуры от условий термообработки.

Заключение. Исследование процессов адсорбции и капиллярной конденсации азота позволяет воспроизводить параметры пористой структуры гидроксипатита и пористого кремния, что является важным показателем для их применения в медицине и электронике в качестве антикоррозионных покрытий и для реализации оптических фильтров.

Ключевые слова: удельная поверхность, пористые материалы, сорбционный анализ, пористый кремний, гидроксипатит

Для цитирования: Леньшин А. С., Мараева Е. В. Особенности применения сорбционного анализа для исследования различных наноматериалов электроники в зависимости от состава и технологических условий получения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 1. С. 47–53. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-47-53

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа частично выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-72-10007 и в рамках государственного задания Минобрнауки России № FZGU-2020-0036, реализуемых в Воронежском государственном университете.

Статья поступила в редакцию 30.09.2021; принята к публикации после рецензирования 03.11.2021; опубликована онлайн 28.02.2022



Application of Sorption Analysis in the Study of Various Nanomaterials Used in Electronics Depending on their Composition and Production Conditions

Alexander S. Lenshin¹, Evgeniya V. Maraeva²✉

¹ Voronezh State University, Voronezh, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ jenvmar@mail.ru

Abstract

Introduction. At present, sorption methods of analysis, including the thermal desorption of inert gases, are widely adopted to characterize the porous structure parameters of nanomaterials having a wide range of applications. Nitrogen thermal desorption belongs to the group of non-destructive techniques that provide a rapid analysis of the following parameters exhibited by nanomaterials: specific surface area, average particle size, mesopore size distribution, as well as the presence or absence of micropores in the system. In this work, mesoporous silicon and calcium hydroxyapatite powders are selected as the objects of research. Since modern interference optical filters are cumbersome and expensive to use, meso- and nanoporous silicon nanostructures are of interest in the implementation of filters for fiber-optic communication systems. Hydroxyapatite can potentially provide high corrosion resistance while posing no risk of toxicity to the environment. In addition, anticorrosion hydroxyapatite coatings are of decisive importance for the practical application of magnesium alloys used to reduce the weight of vehicles, aircraft, and electronics housings.

Aim. To consider the application of the thermal desorption of inert gases, specifically nitrogen thermal desorption, in the study of the porous structure parameters of nanomaterials having various compositions on the example of mesoporous silicon and hydroxyapatite.

Materials and methods. In this work, the thermal desorption of inert gases and capillary condensation were applied to study the porous structure parameters of hydroxyapatite and porous silicon powders. In particular, the nitrogen thermal desorption method was implemented using a Sorbi MS instrument equipped with a Sorbi Prep sample preparation station.

Results. Recommendations are provided on choosing the mass of the adsorbent material required for the study, the sample preparation conditions, as well as the relative partial pressure range of the gas adsorbate. The selected sample types were found to lack a micropore system in the structure. Finally, the dependence of the specific surface area of hydroxyapatite powders and the parameters of its mesoporous structure on heat treatment conditions was analyzed.

Conclusion. The study of nitrogen adsorption and capillary condensation allows the porous structure parameters of hydroxyapatite and porous silicon to be reproduced, which is of great importance for their use in medicine and radio electronics as anticorrosion coatings, as well as for the implementation of optical filters.

Keywords: specific surface area, porous materials, sorption analysis, porous silicon, hydroxyapatite

For citation: Lenshin A. S., Maraeva E. V. Application of Sorption Analysis in the Study of Various Nanomaterials Used in Electronics Depending on their Composition and Production Conditions. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 1, pp. 47–53. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-47-53

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgments. The work was partially supported by a grant of Russian Science Foundation No. 19-72-10007 and a state task of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FZGU-2020-0036.

Submitted 30.09.2021; accepted 03.11.2021; published online 28.02.2022

Введение. Нанопорошки пористого кремния характеризуются высокой удельной поверхностью, которая обуславливает повышенную реакционную способность указанного материала. Ультрадисперсные порошки кремния находят широкое применение в химической промышленности в качестве ката-

литических добавок и адсорбентов, используются при производстве керамики и цемента, применяются в различных областях медицины, а также при реализации фильтров для систем волоконно-оптической связи [1, 3–7]. Так, в [1] реализованы прототипы загрязняющих фильтров ближнего ультра-

трафиолетового и видимого диапазонов, в том числе – загрязжающий фильтр на основе плазмонного резонанса в композиционных наноструктурированных слоях "пористый кремний – серебро".

Биосовместимые порошки на основе гидроксидов апатитов (ГАП) применяются для изготовления биокерамики. ГАП кальция широко используется в таких областях медицины, как стоматология и костная инженерия, в качестве дефектозамещающего материала [8–13]. Важным направлением является создание антикоррозионных покрытий на основе ГАП. Так, в [2] на чистом магнии и его сплавах успешно сформированы кристаллические покрытия ГАП. Исследование процессов адсорбции и капиллярной конденсации азота позволяет воспроизводить параметры пористой структуры ГАП.

В настоящее время сорбция азота при 77 К является стандартным инструментом, позволяющим анализировать материалы с порами в диапазоне размеров 0.5...50 нм. Механизм сорбции азота при 77 К может быть изложен следующим образом. При низком относительном давлении (0.02...0.1) начинается заполнение микропор адсорбатом. Адсорбция монослоя происходит после завершения адсорбции в микропорах. Капиллярная конденсация начинает проявляться в относительно небольших мезопорах, когда относительное давление и ширина пор соответствуют уравнению Кельвина. Изотерма десорбции получается обращением процесса адсорбции, высвобождением жидкого адсорбата и уменьшением равновесного относительного давления [14, 15]. Процесс испарения происходит с мениска конденсированной жидкости.

Целью данной работы является рассмотрение особенностей применения метода тепловой десорбции инертных газов, в частности, азота, для исследования параметров пористой структуры наноматериалов различного состава на примере мезопористого кремния и ГАП кальция.

Материалы и методы. Порошки на основе пористого кремния были получены в Воронежском государственном университете из пластин как p -, так и n -типа электропроводности. Измельчение порошков осуществлялось ультразвуковым, электрохимическим и механическим воздействием.

Порошки ГАП были получены методом химического осаждения. Установка по гидрохимическому осаждению включает: магнитную мешалку с подогревом ES-61201, циркуляционный термостат LOIP LT-208, инертный держатель реакционной ванны (собственная сборка). В качестве исходных прекурсоров были выбраны нитрат кальция и гидроортофосфат аммония. В некоторых случаях по-

лучаемые структуры подвергались микроволновому излучению [9, 11].

Сорбционные характеристики наноматериалов исследовались с использованием прибора Сорби МС, оснащенного станцией пробоподготовки Сорби Преп (ЗАО "МЕТА", Россия, Новосибирск).

При исследовании параметров пористой структуры наноматериалов сорбционным методом важно правильно оценить массу материала-адсорбента, требуемого для исследования, выбрать режим пробоподготовки и установить диапазон изменения относительного парциального давления газа-адсорбата, при которых будет проводиться измерение.

1. Определение массы исследуемого материала и подготовка навески.

При исследовании композиций методом тепловой десорбции азота выбор массы исследуемого материала определяется двумя факторами: возможностью получения устойчивого сигнала десорбции, по которому проводится расчет объема десорбированного газа, и диапазоном полной измеряемой поверхности.

2. Выбор режимов и проведение пробоподготовки исследуемого материала.

Пробоподготовка исследуемого материала, как правило, заключается в контролируемом нагреве образца в потоке инертного газа (гелия). Подготовка необходима, в первую очередь, для удаления влаги и поверхностных загрязнений. Варьируемыми режимами пробоподготовки являются температура нагрева и время.

3. Проведение измерения в заданном диапазоне относительных парциальных давлений газа-адсорбата p/p_0 .

Выбор диапазона значений p/p_0 определяется исследуемым параметром пористой структуры. Измерение удельной поверхности по методу Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ), внешней поверхности и построение распределения мезопор по размерам предполагают выбор разных режимов исследования.

Так, например, на приборе Сорби МС, используемом в настоящей работе, выбираются следующие параметры:

– удельная поверхность – метод БЭТ, диапазон относительных парциальных давлений газа-адсорбата p/p_0 от 6 до 20 %;

– индикация наличия микропор (поры размером менее 2 нм) – сравнительный t -метод анализа де Бура, диапазон относительных парциальных давлений газа-адсорбата p/p_0 от 15 до 40 %;

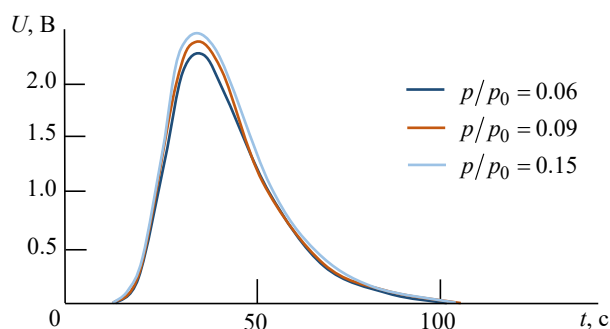


Рис. 1. Линии тепловой десорбции азота, наблюдаемые на начальном этапе исследования порошка мезопористого кремния с удельной поверхностью 400 м²/г

Fig. 1. Nitrogen thermal desorption lines observed at the initial stage of studying mesoporous silicon powder having a specific surface area of 400 м²/г

– распределение мезопор по размерам – метод капиллярной конденсации инертного газа, диапазон относительных парциальных давлений газа-адсорбата p/p_0 от 6 до 97 %.

Результаты. В ходе работы были исследованы параметры пористой структуры наноматериалов различного состава (кремний, ГАП), характеризующиеся разным значением удельной поверхности.

В рамках работы была исследована серия изотерм адсорбций в диапазоне относительных парциальных давлений газа-адсорбата (азота), определена удельная поверхность каждого образца стандартным методом (БЭТ) и оценено наличие/отсутствие микропор в образце. На рис. 1 представлены линии десорбции азота, полученные на образцах мезопористого кремния, площадь каждого формируемого пика пропорциональна объему адсорбированного/десорбированного газа. Для примера показаны линии, полученные при относительном парциальном давлении газа-адсорбата в рамках границы применимости модели БЭТ.

В ходе исследования порошков мезопористого кремния выяснилось, что существенным ограничением для анализа может выступать недостаточная масса образца. Рекомендуемые значения массы навески при выборе данного метода исследования для получения устойчивого сигнала десорбции составляют не менее 5 мг. Рекомендуемые режимы пробоподготовки – 473 К, 40 мин. Рекомендуемый диапазон относительного парциального давления адсорбата – от 5 до 98 %. Превышение давления адсорбируемого газа выше 98 % приводит к нестабильной работе регулятора расхода газа и может быть причиной неправильного анализа данных. Исследования в более узком диапазоне (от 5 до 40 %), традиционно используемом в сорбционном анализе для исследования микропор, не представляются рациональными, так как порошки характеризуются отсутствием системы пор менее 2 нм. Исследования показали, что удельная поверхность порошков мезопористого кремния, полученных измельчением, отвечает диапазону 60... 500 м²/г.

В рамках исследования серии образцов ГАП была проанализирована зависимость удельной поверхности порошков (таблица) и параметров мезопористой структуры (рис. 2, а, б) от условий термообработки.

Значения удельной площади поверхности для образцов гидроксиапатита

Specific surface area values for hydroxyapatite samples

T , К	t , мин	$S_{\text{БЭТ}}$, м ² /г
Без отжига	–	54
423	60	81
573	60	90
873	60	49
1173	60	7

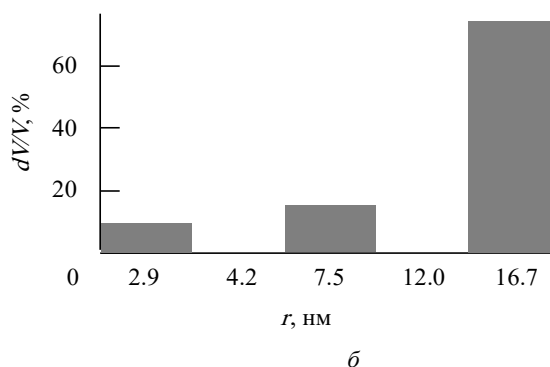
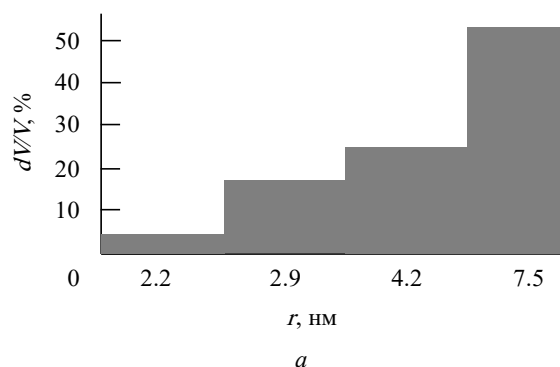


Рис. 2. Гистограмма распределения пор для образца ГАП: а – без термообработки; б – с термообработкой при температуре 1173 К

Fig. 2. Pore distribution histogram for hydroxyapatite: а – without heat treatment; б – with heat treatment at temperature 1173 К

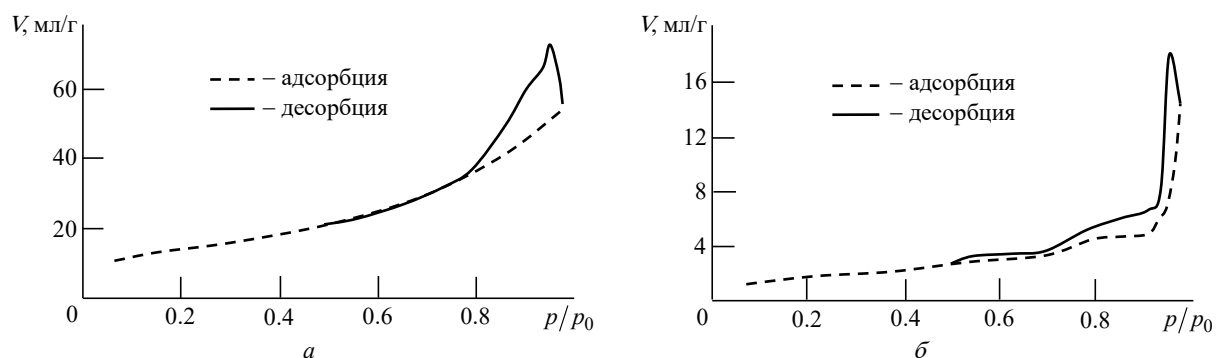


Рис. 3. Полная изотерма адсорбции для ГАП: *а* – без термообработки;
б – с термообработкой при температуре 1173 К

Fig. 3. Complete adsorption isotherm for hydroxyapatite: *a* – without heat treatment;
b – heat-treated at 1173 K

Рекомендуемое значение массы образцов ГАП для исследования методом тепловой десорбции азота составляет от 150 до 1000 мг в зависимости от режима термообработки. Условия пробоподготовки образцов – 423 К, 60 мин.

Гистограммы распределения мезопор по размерам были построены на основе анализа полных изотерм адсорбции азота на порошках ГАП. На рис. 3, *а*, *б* для примера приведены изотермы адсорбции азота для ГАП без термообработки и с термообработкой при температуре 1173 К.

Сопоставляя данные, приведенные в таблице, с данными, представленными на рис. 2, 3, можно сделать вывод, что убывание удельной поверхности при температуре 1173 К обусловлено разрастанием пор, что согласуется с гистограммой распределения пор по размерам (см. рис. 2) и исчезновением системы пор со средним радиусом 4.2 и 12 нм при спекании (или укрупнении частиц). Относительно небольшая удельная поверхность образца без термообработки объясняется наличием влаги, которая была удалена во всех остальных образцах.

Заключение. В статье описаны особенности применения метода тепловой десорбции инертных газов для исследования наноматериалов различного состава на примере мезопористого кремния и ГАП.

Подобраны рекомендуемые значения массы для получения устойчивого сигнала десорбции и рекомендуемые режимы пробоподготовки для исследования мезопористого кремния и ГАП. Как правило, при исследовании материалов методом тепловой десорбции инертных газов существенным ограничением для анализа может выступать недостаточная масса образца. В случае исследования наноматериалов с высокой удельной поверхностью, наоборот, слишком большая масса адсорбента может привести к получению некорректного сигнала датчика по теплопроводности и усечению пика.

Исследование сорбционных характеристик обеспечивает возможность быстрого и недорогого анализа структурных свойств ГАП, пористого кремния и других порошковых наноматериалов, используемых в радиоэлектронике.

Список литературы

1. Магнитные и плазмонные композиционные наноструктуры для реализации оптических фильтров в системах контроля и диагностики веществ и материалов / Р. С. Смердов, Ю. М. Спивак, В. А. Мошников, А. С. Мустафаев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 3. С. 81–97. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-81-97
2. Hiromoto S., Yamamoto A. High corrosion resistance of magnesium coated with hydroxyapatite directly synthesized in an aqueous solution // *Electrochimica Acta*. 2009. Vol. 54, № 27. P. 7085–7093. doi: 10.1016/j.electacta.2009.07.033
3. Porous Silicon as a Nanomaterial for Disperse Transport Systems of Targeted Drug Delivery to the Inner Ear / Yu. M. Spivak, A. O. Belorus, A. A. Panevin,

- S. Zhuravskii, V. A. Moshnikov, K. Bespalova, P. A. Somov, Yu. Zhukov, A. S. Kolomov, L. V. Chistykh, N. Grigoryeva // *Technical Physics*. 2018. Vol. 63. P. 1352–1360. doi: 10.1134/S1063784218090207
4. Porous silicon as efficient surface enhanced Raman scattering (SERS) substrate / F. Giorgis, E. Descrovi, A. Chiodoni, E. Froner, M. Scarpa, A. Venturello, F. Geobaldo // *Applied Surface Science*. 2008. Vol. 254, № 22. P. 7494–7497. doi: 10.1016/j.apsusc.2008.06.029
5. Low-frequency dielectric relaxation in structures based on macroporous silicon with meso-macroporous skin-layer / R. Castro, Yu. Spivak, S. Shevchenko, V. Moshnikov // *Materials*. 2021. Vol. 16, № 10. P. 2473. doi: 10.3390/ma14102471

6. Experimental study of structural and optical properties of integrated MOCVD GaAs/Si(001) heterostructures / P. V. Seredin, A. S. Lenshin, D. S. Zolotukhin, I. N. Arsentyev, D. N. Nikolaev, A. V. Zhabotinskiy // *Physica B: Condensed Matter*. 2018. Vol. 530. P. 30–37. doi: 10.1016/j.physb.2017.11.028

7. Lenshin A. S., Polkovnikova Y. A., Seredin P. V. Study of the deposition process of vinpocetine on the surface of porous silicon // *Results in Physics*. 2016. Vol. 6. P. 337–338. doi: 10.1016/j.rinp.2016.06.008

8. Saxena V., Hasan A., Pandey L. M. Effect of integration with hydroxyapatite: a review // *Materials technology*. 2018. Vol. 33, № 2. P. 79–92. doi: 10.1080/10667857.2017.1377972

9. Maraeva E. V., Khalugarova K. Size analysis based on sorption study data for hydroxyapatite nanoparticles // *Materials science forum*. 2021. Vol. 1031. P. 172–177. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1031.172

10. Dou L. B., Zhang Y. C., Sun H. W. Advances in Synthesis and Functional Modification of Nanohydroxyapatite // *J. of Nanomaterials*. 2018. Vol. 2018. P. 1–8. doi: 10.1155/2018/3106214

11. Evaluation of hemocompatibility and in vitro immersion on microwave-assisted hydroxyapatite–

alumina nanocomposites / G. Radha, S. Balakumar, B. Venkatesan, E. Vellaichamy // *Materials Science and Engineering: C*. 2015. Vol. 50. P. 143–150. doi: 10.1016/j.msec.2015.01.054

12. 3D printing of ceramics: a review / Z. W. Chen, Z. Y. Li, J. J. Li, Ch. Liu, Ch. Lao, Yu. Fu, Ch. Liu, Ya. Li, P. Wang, Y. He // *J. of the European Ceramic Society*. 2019. Vol. 39, № 4. P. 661–687. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013

13. Galindo T. G. P., Chai Y. D., Tagaya M. Hydroxyapatite Nanoparticle Coating on Polymer for Constructing Effective Biointeractive Interfaces // *J. of Nanomaterials*. 2019. Vol. 2019. P. 1–24. doi: 10.1155/2019/6495239

14. Zelenka T. Adsorption and desorption of nitrogen at 77 K on micro- and mesoporous materials: Study of transport kinetics // *J. of Microporous and Mesoporous Materials*. 2016. Vol. 227. P. 202–209. doi: 10.1016/j.micromeso.2016.03.009

15. Wang G, Wang K, Ren T. Improved analytic methods for coal surface area and pore size distribution determination using 77 K nitrogen adsorption experiment // *Intern. J. of Mining Science and Technology*. 2014. Vol. 24, № 3. P. 329–334. doi: 10.1016/j.ijmst.2014.03.007

Информация об авторах

Леньшин Александр Сергеевич – доктор физико-математических наук (2020), ведущий научный сотрудник кафедры физики твердого тела и теплоэнергетики, доцент кафедры физики теплотехники и теплоэнергетики Воронежского государственного университета инженерных технологий. Автор 127 научных работ. Сфера научных интересов – нанотехнологии и наноматериалы; электрохимия; пористый кремний. Адрес: Воронежский государственный университет, Университетская пл., д. 1, Воронеж, 394018, Россия E-mail: lenshinas@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-1939-253X>

Мараева Евгения Владимировна – кандидат физико-математических наук (2014), доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 86 научных работ. Сфера научных интересов – нанотехнологии и наноматериалы; пористые материалы и методы сорбционного анализа; халькогениды свинца. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 литера Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия E-mail: jenvmar@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-0000-7953>

References

1. Smerdov R. S., Spivak Yu. M., Moshnikov V. A., Mustafaev A. S. Magnetic and Plasmonic Composite Nanostructures for Creating Optical Filters at Substance and Material Diagnostics Systems. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2021, vol. 24, no. 3, pp. 81–97. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-81-97 (In Russ.)

2. Hiromoto S., Yamamoto A. High Corrosion Resistance of Magnesium Coated with Hydroxyapatite Directly Synthesized in an Aqueous Solution. *Electrochimica Acta*. 2009, vol. 54, no. 27, pp. 7085–7093. doi: 10.1016/j.electacta.2009.07.033

3. Spivak Yu. M., Belorus A. O., Panevin A. A., Zhuravskii S., Moshnikov V. A., Bepalova K., So-

mov P. A., Zhukov Yu., Kolomov A. S., Chistykh L. V., Grigoryeva N. Porous Silicon as a Nanomaterial for Disperse Transport Systems of Targeted Drug Delivery to the Inner Ear. *Technical Physics*. 2018, vol. 63, pp. 1352–1360. doi: 10.1134/S1063784218090207

4. Giorgis F., Descrovi E., Chiodoni A., Froner E., Scarpa M., Venturello A., Geobaldo F. Porous Silicon as Efficient Surface Enhanced Raman Scattering (SERS) Substrate. *Applied Surface Science*. 2008, vol. 254, no. 22, pp. 7494–7497. doi: 10.1016/j.apsusc.2008.06.029

5. Castro R, Spivak Yu., Shevchenko S., Moshnikov V. Low-Frequency Dielectric Relaxation in Structures Based on Macroporous Silicon with Meso-Macroporous Skin-

Layer. Materials. 2021, vol. 16, no. 10, p. 2473. doi: 10.3390/ma14102471

6. Seredin P. V., Lenshin A. S., Zolotukhin D. S., Arsenyev I. N., Nikolaev D. N., Zhabotinskiy A. V. Experimental Study Of Structural and Optical Properties of Integrated MOCVD GaAs/Si(001) Heterostructures. Physica B: Condensed Matter. 2018, vol. 530, pp. 30–37. doi: 10.1016/j.physb.2017.11.028

7. Lenshin A. S., Polkovnikova Y. A., Seredin P. V. Study of the Deposition Process of Vinpocetine on the Surface of Porous Silicon. Results in Physics. 2016, vol. 6, pp. 337–338. doi: 10.1016/j.rinp.2016.06.008

8. Saxena V., Hasan A., Pandey L. M. Effect of Integration with Hydroxyapatite: a Review. Materials technology. 2018, vol. 33, no. 2, pp. 79–92. doi: 10.1080/10667857.2017.1377972

9. Maraeva E. V., Khalugarova K. Size Analysis Based on Sorption Study Data for Hydroxyapatite Nanoparticles. Materials Science Forum. 2021, vol. 1031, pp. 172–177. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1031.172

10. Dou L. B., Zhang Y. C., Sun H. W. Advances in Synthesis and Functional Modification of Nanohydroxyapatite. J. of Nanomaterials. 2018, vol. 2018, pp. 1–8. doi: 10.1155/2018/3106214

11. Radha G., Balakumar S., Venkatesan B., Vellaichamy E. Evaluation of Hemocompatibility and in Vitro Immersion on Microwave-Assisted Hydroxyapatite–Alumina Nanocomposites. Materials Science and Engineering: C. 2015, vol. 50, pp. 143–150. doi: 10.1016/j.msec.2015.01.054

12. Chen Z. W., Li Z. Y., Li J. J., Liu Ch., Lao Ch., Fu Yu., Liu Ch., Li Ya., Wang P., He Y. 3D Printing of Ceramics: a Review. J. of the European Ceramic Society. 2019, vol. 39, no. 4, pp. 661–687. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013

13. Galindo T. G. P., Chai Y. D., Tagaya M. Hydroxyapatite Nanoparticle Coating on Polymer for Constructing Effective Biointeractive Interfaces. J. of Nanomaterials. 2019, vol. 2019, pp. 1–24. doi: 10.1155/2019/6495239

14. Zelenka T. Adsorption and Desorption of Nitrogen at 77 K on Micro- and Mesoporous Materials: Study of Transport Kinetics. J. of Microporous and Mesoporous Materials. 2016, vol. 227, pp. 202–209. doi: 10.1016/j.micromeso.2016.03.009

15. Wang G., Wang K., Ren T. Improved Analytic Methods for Coal Surface Area and Pore Size Distribution Determination Using 77K Nitrogen Adsorption Experiment. Intern. J. of Mining Science and Technology. 2014, vol. 24, no. 3, pp. 329–334. doi: 10.1016/j.ijmst.2014.03.007

Information about the authors

Alexander S. Lenshin, Dr Sci (Phys. and Math.) (2020), Lead Researcher, Voronezh State University, Associate Professor at the Engineering Technologies Department of Voronezh State University The author of 127 scientific publications. Area of expertise: nanotechnology and nanomaterials; electrochemistry, porous silicon.
Address: Voronezh State University, 1 Universitetskaya Sq., Voronezh 394018, Russia
E-mail: lenshinas@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1939-253X>

Evgeniya V. Maraeva, Cand. Sci. (Phys. and Math.) (2014), Associate Professor at the Micro- and Nanoelectronics Department of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 86 scientific publications. Area of expertise: nanotechnology and nanomaterials; porous materials and methods of sorption analysis; lead chalcogenides.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: jenvmar@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0000-7953>

Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий

УДК 004.9; 004.82; 617.58-77

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-1-54-63>

Матричная модель для создания логических фильтров электронного каталога протезных модулей при персонифицированном синтезе протеза

Л. М. Смирнова^{1,2}✉, Е. В. Фогт^{1,2}, А. В. Синегуб¹, Х. Солиман^{1,3}

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² ФГБУ "Федеральный центр реабилитации инвалидов им. Г. А. Альбрехта" Министерства труда и социальной защиты РФ, Санкт-Петербург, Россия

³ Университет Тишрин, Латакия, Сирия

✉ info@diaserv.ru

Аннотация

Введение. При синтезе протеза из промышленно выпускаемых узлов возникает проблема выбора из большой номенклатуры комплектующих, различающихся по своим свойствам и характеристикам. Решить проблему может создание информационно-измерительной системы для измерения и анализа биомедицинской информации о состоянии пациента и использование полученных результатов как критериев выбора моделей узлов протеза из глобальной базы данных. С этой целью в программное обеспечение системы должна быть заложена соответствующая база знаний.

Цель работы. Обоснование целесообразности представления базы знаний о требованиях к характеристикам узлов протеза нижней конечности в виде матричной модели для создания системы логических фильтров выбора моделей узлов из электронного каталога.

Материалы и методы. В качестве методов исследования применены: теоретический метод, включающий анализ, синтез и аналогию; экспертный опрос ведущих специалистов. Для унификации описания структурно-функционального состояния инвалида используется понятийный язык Международной классификации функционирования (МКФ), ограничения жизнедеятельности и здоровья.

Результаты. На основном этапе фильтрации протезных модулей требуется посредством специализированного программного обеспечения под запросы пользователя сформировать выборку моделей модулей, наиболее релевантных потребностям протезируемого пациента, которые определяются показателями состояния его здоровья, а также связанными со здоровьем факторами. Представлена форма модели базы знаний для отражения логики процедуры выбора протезных узлов и решения основной проблемы организации фильтрации этих объектов в электронном каталоге.

Заключение. Матричное представление базы знаний, отражающее правила выбора комплектующих протеза нижней конечности с учетом показателей состояния пациента, является базой для создания системы логических фильтров в электронном каталоге протезных модулей при персонифицированном синтезе протеза. Использование понятийного языка МКФ при описании факторов, влияющих на выбор протезных модулей, является шагом по пути формирования цифрового профиля протезируемого, что соответствует стратегии перехода на технологии цифровой медицины.

Ключевые слова: логические фильтры, база знаний, матричная модель, протезные модули, нижняя конечность, протезирование, реабилитация

Для цитирования: Матричная модель для создания логических фильтров электронного каталога протезных модулей при персонифицированном синтезе протеза / Л. М. Смирнова, Е. В. Фогт, А. В. Синегуб, Х. Солиман // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 1. С. 54–63. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-54-63

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 29.10.2021; принята к публикации после рецензирования 16.12.2021; опубликована онлайн 28.02.2022

A Matrix Model for Creating Logical Filters of an Electronic Catalog of Prosthetic Modules for Customized Prostheses

Ludmila M. Smirnova^{1,2}, Elizaveta V. Fogt^{1,2}, Andrey V. Sinegub², H. Solieman^{1,3}

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² Albrecht Federal Scientific Centre of Rehabilitation of the Disabled, St Petersburg, Russia

³ Tishreen University, Latakia, Syria

✉ info@diaserv.ru

Abstract

Introduction. When synthesizing a prosthesis from ready-made prosthesis units, the prosthetist is faced with the problem of selecting from a large range of components that differ in properties and characteristics. This challenge can be overcome by the creation of a system for processing the patient's biomedical information and its further use as criteria for selecting prosthetic nodes from a global database. For this purpose, an appropriate knowledge base must be incorporated into the system software.

Aim. Substantiation of the expediency of presenting the knowledge base about the requirements for the lower limb prosthesis nodes in the form of a matrix model for creating a system of logical filters in the process of selecting nodes from an electronic catalog.

Materials and methods. Theoretical research methods were used, including analysis, synthesis and analogy. An expert survey among leading specialists was carried out. To unify the description of the structural and functional state of a disabled person, the terms of the International Classification of Functioning (ICF), Disability and Health were used.

Results. At the main stage of filtering, prosthetic modules optimally meeting the patient's needs are selected using a specialized software application, depending on the patient's health status and various health-related factors. A model of the knowledge base is presented, which describes the logic of selecting prosthetic nodes and their filtering in an electronic catalog.

Conclusion. The matrix representation of the knowledge base that contains rules for selecting components of lower limb prostheses, taking into account the patient's condition, is a basis for creating a system of logical filters when searching for prosthetic modules in an electronic catalog for creating customized prostheses. The use of the ICF conceptual language for describing the factors influencing the choice of prosthetic modules is a step towards the formation of a patient's digital profile, which corresponds to the strategy of transition to digital medicine technologies.

Keywords: logical filters, knowledge base, matrix model, prosthetic modules, lower limb, prosthetics, rehabilitation

For citation: Smirnova L. M., Fogt E. V., Sinegub A. V., Solieman H. A Matrix Model for Creating Logical Filters of an Electronic Catalog of Prosthetic Modules for Customized Prostheses. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 1, pp. 54–63. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-54-63

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 29.10.2021; accepted 16.12.2021; published online 28.02.2022

Введение. Модульное протезирование конечностей из готовых промышленно выпускаемых компонентов в настоящее время признано основным.

Одним из вариантов управления качеством модульного протезирования является рациональный персонализированный выбор комплектующих – протезных модулей для синтеза протеза с учетом текущего состояния протезируемого. В настоящее время для этого используются различные информа-

ционные каталоги протезной продукции, выпускаемые ее производителями и поставщиками. В некоторых из каталогов представлена система рекомендаций по назначению протезных модулей. Основная проблема такого выбора заключается в необходимости его осуществления из большой номенклатуры моделей протезных модулей, поставляемых разными производителями и различающихся по своим свойствам и характеристикам. Решению

проблемы может помочь создание информационно-измерительной системы для измерения биомедицинской информации о состоянии пациента и использование ее как критериев выбора моделей узлов протеза из глобальной базы данных. С этой целью в программное обеспечение системы должна быть заложена соответствующая база знаний.

Наиболее известна классификационная система рекомендаций по назначению протезных модулей "MOBIS", представленная в каталогах компании Ottobock SE & Co. KGaA (Германия) [1]. В данной системе при выборе модели рекомендуется учитывать уровень двигательной активности пациента (представлены описания для четырех градаций этого показателя – низкий, средний, повышенный и высокий) и массу тела пациента (4 градации – до 75 кг, 100 кг, 125 кг и более). В соответствии с этими характеристиками и целью назначения протеза (например, для обычной жизнедеятельности, для плавания и пр.) специалист подбирает модели модулей (узлов протеза) по каталогам, учитывая также информацию производителя о конструктивной возможности их сочленения в едином протезе.

Иной принцип классификации продукции применяется в каталогах ОАО «РКК "Энергия"» (г. Королев, Московская область, Россия) [2]. В них модели разделены на 2 класса – для детей и для взрослых, а далее – на группы по типу протеза (протез голени, бедра, после вычленения бедра и межподвздошно-брюшной ампутации) и, наконец, по уровню двигательной активности пациента (всего 3 градации – низкая, средняя, высокая). В описании моделей указаны некоторые конструкционные, функциональные и эксплуатационные характеристики, предельная масса тела пациента для их назначения.

В этих и других каталогах классификация продукции, объем и формат представления информации о характеристиках протезных моделей, система рекомендаций по их назначению значительно различаются, в том числе и количество градаций уровней двигательной активности, их характеристики [3–6]. В итоге протезист испытывает значительные затруднения при выборе нужных для пациента моделей протезных модулей среди большой номенклатуры продукции отечественных и зарубежных производителей.

Ошибка в этом случае может заключаться в применении в протезе модулей, недостаточная функциональность которых не позволяет в полной мере реализоваться реабилитационному потенциалу пациента. Либо, наоборот, в протезе

могут быть использованы высокотехнологичные дорогостоящие модели модулей, обладающие повышенной функциональностью, прочностью, износостойкостью, которые не будут в полной мере востребованы из-за недостаточного реабилитационного потенциала протезируемого. Или же состав комплектующих протеза может не соответствовать обоснованным персональным требованиям инвалида к характеристикам протеза, условиям его эксплуатации в процессе жизнедеятельности протезированного. Таким образом, нерациональный выбор комплектующих модульного протеза приводит к снижению качества протезирования и эффективности реабилитации пациента, неполной реализации потенциальной возможности повышения качества жизни инвалида, нерациональному распределению финансовых затрат на протезирование.

Для разрешения этой проблемы требуется создание инновационной компьютерной технологии персонифицированного синтеза протеза нижней конечности, позволяющей повысить удобство и обоснованность выбора моделей протезных модулей пациенту с учетом множества показателей его состояния. Одной из задач разработки такой технологии является формирование глобального электронного каталога – базы данных (БД) протезной продукции разных производителей с информацией, систематизированной по единой схеме с учетом функциональных, эстетических, эксплуатационных характеристик моделей, которые должны учитываться при персонифицированном выборе их пациенту. Необходимость и принцип создания такого каталога были обоснованы ранее [7, 8], но развитием этого направления является разработка системы логических фильтров для формирования из глобального электронного каталога таких выборок моделей, которые будут соответствовать показателям состояния пациента. Данные фильтры должны быть основаны на информации о совместимости между показателями состояния пациента, с одной стороны, и характеристиках протезных модулей – с другой.

Целью исследования является обоснование целесообразности представления базы знаний о требованиях к характеристикам комплектующих протеза нижней конечности в виде матричной модели для создания системы логических фильтров выбора моделей из электронного каталога протезных модулей при персонифицированном синтезе протеза нижней конечности.

Материалы и методы. В качестве методов исследования применены:

– теоретический метод, включающий анализ, синтез и аналогию;

– экспертный опрос ведущих специалистов Института протезирования и ортезирования Федерального государственного бюджетного учреждения "Федеральный научный центр реабилитации инвалидов им. Г. А. Альбрехта" Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации (Санкт-Петербург, Россия), обладающих теоретическими знаниями и более чем тридцатилетним практическим опытом протезирования пациентов после ампутации нижней конечности.

При описании структурно-функционального состояния организма протезируемого использовалась терминология и определители нарушений, принятые в Международной классификации функционирования, ограничений жизнедеятельности и здоровья (МКФ) (ICF – International Classification of Functioning, Disability and Health) [9].

Результаты исследования. На первом – основном – этапе фильтрации протезных модулей, представленных в электронном каталоге, требуется посредством специализированного программного обеспечения под запросы пользователя сформировать выборку моделей модулей, наиболее релевантных потребностям протезируемого пациента, которые определяются показателями состояния его здоровья, а также связанными со здоровьем факторами. После фильтрации и сортировки моделей пользователь может остаться на той же странице приложения, но на ней должны отображаться активными только те объекты, которые не противопоказаны пациенту по медицинским показаниям, а их расположение должно отражать приоритеты выбора в соответствии с текущим состоянием пациента (его здоровья и связанных с ним факторов, влияющих на требования к протезированию). На следующем этапе выбора фильтрация должна осуществляться по запросу о совместимости модели модуля с остальными комплектующими протеза и лишь затем – по личным предпочтениям инвалида, в частности – эстетическим (например, цвет обложки стопы и пр.).

Основные проблемы организации фильтрации этих объектов в планируемом для создания глобальном электронном каталоге, объединяющем продукцию различных производителей, связаны с отсутствием базы знаний, отражающей логику процедуры выбора.

Признаки, по которым модели протезных мо-

дулей различаются между собой и которые в первую очередь должны учитываться при комплектации протеза, целесообразно разделить на множества: конструктивных характеристик W , функциональных X , эстетических Y , эксплуатационных Z .

Для персонифицированного выбора моделей протезных модулей предлагается использовать номенклатуру факторов в виде двух непересекающихся множеств: P – базовых факторов и F – факультативных.

Факторы P обязательно учитываются протезистами при выборе искусственной стопы, для чего в каталогах некоторых производителей представлены соответствующие классификации и формализованные рекомендации. В отличие от этого факультативные факторы F часто незаслуженно игнорируются при комплектации модульного протеза, что приводит к снижению качества протезирования.

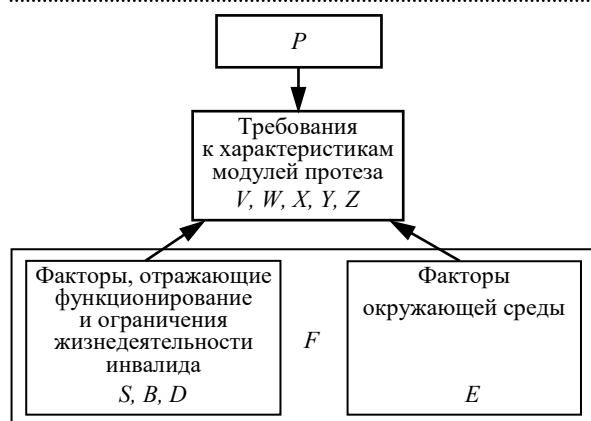
Например, при выборе модели искусственной стопы учитывается 7 базовых факторов:

$$P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7\},$$

где p_1 – тип протезирования (первичное или повторное); p_2 – целевое назначение протеза (для повседневного использования, купания, занятий адаптивной физкультурой или определенным видом спорта и т. п.); p_3 – возрастная группа пациента (взрослые или дети); p_4 – пол (женский или мужской); p_5 – масса тела; p_6 – размер сохранный стопы; p_7 – уровень двигательной активности (нулевой, низкий, сниженный, средний, высокий).

В качестве факультативных факторов F целесообразно рассматривать те, которые отражают функционирование и ограничения жизнедеятельности инвалида, его активность и участие в решении жизненных задач, характеристики окружающей среды. Множество F разделено на 4 подгруппы однородных факторов: S – показатели состояния структур организма протезируемого; B – его функций; D – активности (выполнения задач или действий инвалидом) и участия (вовлечения в жизненную ситуацию); E – окружающей среды, в которой планируется использовать протез.

Таким образом, требования к протезу и выбор моделей протезных модулей определяются множеством базовых факторов P и факультативных F ,



Модель формирования требований к модулям протеза
A model of generating requirements for prosthesis modules

представляющих собой непересекающиеся множества $P \cap F = \emptyset$. Модель формирования требований к модулям протеза показана на рисунке.

Наименование и смысловое содержание факультативных факторов F соответствует аналогичным категориям, используемым в составляющих МКФ: b – "функции организма"; s – "структуры организма"; d – "активность и участие"; e – "факторы окружающей среды":

$$S \subset s; B \subset b; D \subset d; E \subset e.$$

Модель здоровья человека в МКФ представлена на основе интеграции медицинской и социальной субмоделей [10–12]. Учитывая эти обстоятельства, понятийный язык МКФ целесообразно использовать и при описании системы факторов, влияющих на выбор комплектующих протеза.

Формула кода в МКФ [13]:

$$\text{МКФ-код} = \text{префикс} + \text{шифр домена} + \\ + \text{определитель},$$

где префикс – буквенное обозначение составляющей, к которой относится домен МКФ (набор взаимосвязанных физиологических функций, анатомических структур, действий, задач и сфер жизнедеятельности индивида); шифр домена – числовой код раздела первого уровня (одна цифра), второго уровня (две цифры), третьего и четвертого уровней (по одной цифре на каждый уровень); определитель – количественная оценка нарушения функции или структуры организма, реализации или потенциальной способности активности (деятельности) протезируемого, выраженности барьеров или облегчающих факторов окружающей среды [14–16].

Следует учитывать, что только классификации функций и структур организма в МКФ содержат 4 уровня детализации. Например, для кодирования умеренного нарушения вестибулярной функции передвижения используется код $b2352.2$, согласно которому: b – составляющая "функции организма"; $b2$ – "сенсорные функции и боль"; $b235$ – "вестибулярные функции"; $b2352$ – "вестибулярные функции передвижения"; цифра 2 после точки означает умеренное нарушение.

В качестве базы знаний, отражающей правила основного этапа выбора моделей искусственной стопы, предлагается использовать матричную модель, устанавливающую соответствие между номенклатурой запросов выбора (факторов, от которых зависят требования к модулям протеза) и номенклатурой признаков объектов выбора (характеристик протезных модулей) (табл. 1).

В матричной модели, форма которой представлена табл. 1, ниже обозначений факторов

Табл. 1. Форма матричной модели базы знаний для выбора моделей модулей протеза конечности

Tab. 1. A matrix model of the knowledge base for selecting prosthetic limb modules

		Факультативные факторы выбора моделей протезных модулей																			
		S					B					D					E				
		s_1	...	s_i	...	s_n	b_1	...	b_j	...	b_m	d_1	...	d_k	...	d_r	e_1	...	e_l	...	e_t
		Область градации оценок факторов																			
Характеристики протезных модулей	W	w_1	Область отображения соответствия между оценками факторов и характеристиками протезного модуля																		
		...																			
		w_c																			
	X	x_1																			
		...																			
		x_f																			
	Y	y_1																			
		...																			
		y_p																			
	Z	z_1																			
		...																			
		z_v																			

должна быть также указана их градация по возможным вариантам оценки по шкале МКФ.

Для оценки функций организма *B* требуется применение определителя первого уровня, шкала оценки которого имеет 5 градаций выраженности нарушений: "0" – нет нарушений (0...4 %); "1" – легкие нарушения (5...24 %); "2" – умеренные (25...49 %); "3" – тяжелые (50...95 %); "4" – абсолютные (96...100 %). При оценке структур организма (*S*) дополнительно применяется определитель второго уровня со шкалой оценки для уточнения локализации нарушений структуры. Для оценки активности и участия (*D*) используются определители: "реализация" – для оценки активности (деятельности) индивида в условиях реально окружающей его среды; "потенциальная способность" ("капацитет") – для оценки потенциальной способности протезируемого выполнять действие. С этой целью используется шкала оценки: "0" – нет затруднений (0...4 %); "1" – легкие (5...24 %); "2" – умеренные (25...49 %); "3" – тяжелые (50...95 %); "4" – абсолютные (96...100 %). Для оценки окружающей среды (*E*) применяется определитель с негативной и позитивной шкалами. Первая из них используется для обозначения степени выраженности барьера ("0" – нет барьеров (0...4 %), "1" – незначительные (5...24 %), "2" – умеренные (25...49 %), "3" – выраженные (50...95 %), "4" – абсолютные (96...100 %)); вторая – для обозначения облегчающих факторов ("0" – нет облегчающих факторов (0...4 %), "+1" – незначительные (5...24 %), "+2" – умеренные (25...49 %), "+3" – выраженные (50...95 %), "+4" – абсолютные (96...100 %)).

Правила выбора моделей должны быть представлены в матричной модели в виде кодов соответствия факторов выбора признакам объектов выбора, т. е. эти коды должны быть установлены в ячейках на пересечении столбцов с оценками факторов и строк с признаками, отражающими конструктивные, функциональные, эстетические и эксплуатационные характеристики протезных модулей. Для решаемой задачи выбора модели протезного модуля целесообразно использовать 3 значения кода: "не рекомендуется", "допускается", "рекомендуется". Эти кодовые значения в матричной модели могут быть представлены в виде символов (например, букв "Н", "Д", "Р") и/или (для лучшей визуализации) обозначены цветом (например, красный, желтый, зеленый).

Для выбора моделей узлов протеза наиболее значимыми являются факторы, соответствующие

домену *b* МКФ, отражающие состояние функций организма инвалида, а для протеза нижней конечности – именно 4 группы, входящие в этот домен – *b1*, *b2*, *b4*, *b7*).

Группа b1 – "Умственные функции": *b130* – волевые и побудительные; *b140* – внимания; *b144* – памяти; *b152* – эмоций (в частности, их адекватности – *b1520*); *b156* – восприятия (тактильного – *b1564*, визуально-пространственного – *b1565*). *Группа b2* – "Сенсорные функции и боль", а именно: *b2100* – острота зрения; вестибулярные функции – пространственного положения – *b2350*, равновесия – *b2351*; передвижения – *b2352*; дополнительные сенсорные функции (*b260* – проприоцептивная, включая функции статестезии и кинестезии; *b265* – осязания). *Группа b4* – "Функции сердечно-сосудистой, кровеносной, иммунной и дыхательной систем": *b410* – сердца (температура сердечных сокращений – *b4100*, ритм – *b4101* и др.); *b415* – кровеносных сосудов (функции артерий – *b4150*, капилляров – *b4151*, вен – *b4152*); *b420* – артериального давления (его повышения – *b4200*, снижения – *b4201*, поддержания – *b4202*; *b455* – толерантности к физической нагрузке (общая физическая выносливость – *b4550*, аэробный резерв – *b4551*, утомляемость – *b4552*). И, наконец, *группа b7* МКФ – "Нейромышечные, скелетные и связанные с движением функции": *b710* – подвижность суставов конечности и *b715* – их стабильность; такие двигательные функции, как моторно-рефлекторные – *b750*, непроизвольной двигательной реакции – *b755*, контроль произвольных двигательных функций – *b760*, непроизвольные двигательные функции – *b765*.

Поскольку искусственная стопа является модулем, входящим в любой протез нижней конечности, и в значительной степени определяет его биомеханические свойства, именно на примере ее выбора целесообразно представить фрагмент матричной модели для организации логических фильтров электронного каталога протезных модулей (табл. 2). В представленном фрагменте отражено соответствие только функциональных характеристик моделей и только состоянию нейромышечных, скелетных и связанных с движением функций организма протезируемого.

Обозначения, используемые в табл. 2:

– для показателей состояния функций организма: *b710* – подвижность сустава и *b715* – стабильность сустава (КС – коленного, ТБС – тазо-

Табл. 2. Фрагмент матричной модели, отражающей базу знаний для организации второго уровня фильтрации (по факультативным факторам) моделей искусственных стоп в электронном каталоге (только по функциональным характеристикам моделей и с учетом только состояния нейромышечных, скелетных и связанных с движением функций организма протезируемого)

Tab. 2. A fragment of the matrix model reflecting the knowledge base for organizing the second level of filtering (by optional factors) of artificial foot models in an electronic catalog (only by the functional characteristics of the models and taking into account only the state of neuromuscular, skeletal and movement-related functions of the disabled person)

Функциональные характеристики искусственной стопы		Показатели и варианты оценок состояния функций организма (группа b7 по МКФ)																										
		b710										b715										b7500, b7501, b755, b7600, b7601, b7602, b7603, b7650, b7653						
Обозначение	Варианты оценок	КС					ТБС					КС					ТБС											
		0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4		
П	0	Д	Д	Н	Н	Н						Д	Д	Д	Р	Р						Д	Д	Д	Р	Р		
	1	Д	Р	Р	Р	Р						Д	Д	Д	Н	Н						Д	Д	Д	Д	Д		
	2	Д	Д	Н	Н	Н						Д	Д	Д	Н	Н						Д	Д	Д	Н	Н		
	3	Д	Д	Н	Н	Н						Д	Д	Д	Н	Н						Д	Д	Д	Н	Н		
Рп	0	Д	Д	Д	Н	Н	Д	Д	Д	Н	Н																	
	1	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д																	
	2	Д	Д	Д	Н	Н	Д	Д	Д	Д	Д																	
	3	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д																	
М	0											Д	Д	Д	Д	Р	Д	Д	Д	Д	Р	Д	Д	Д	Д	Р	Р	
	1											Д	Д	Д	Р	Н	Д	Д	Д	Д	Р	Н	Д	Д	Д	Н	Н	
Д	1	Д	Д	Р	Р	Р						Д	Д	Д	Н	Н	Д	Д	Д	Д	Н	Н	Д	Д	Д	Д	Н	Н
	2	Д	Д	Д	Д	Д						Д	Д	Д	Д	Н	Д	Д	Д	Д	Н	Д	Д	Д	Д	Д	Н	
	3	Д	Д	Н	Н	Н						Д	Д	Д	Д	Н	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	
	4	Д	Д	Д	Н	Н						Д	Д	Д	Н	Н	Д	Д	Д	Д	Н	Н	Д	Д	Д	Н	Н	
У	1	Д	Д	Н	Н	Н	Д	Д	Р	Р	Р	Р	Р	Д	Н	Н	Д	Д	Д	Н	Н	Р	Р	Д	Н	Н	Н	
	2	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Н	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	
	3	Д	Д	Р	Р	Р	Д	Д	Н	Н	Н	Д	Д	Д	Н	Н	Д	Д	Д	Н	Н	Д	Д	Д	Д	Д	Д	
	4	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	
Э	1											Д	Д	Д	Р	Р												
	2											Д	Д	Д	Н	Н												
	3											Д	Д	Д	Н	Н												

бедренного); b7500 – двигательный рефлекс растяжения, b7501 – рефлексы на повреждающий стимул, b755 – функция произвольной двигательной реакции, b7600 – контроль простых произвольных движений, b7601 – контроль сложных произвольных движений, b7602 – координация произвольных движений, b7603 – опорные функции руки или ноги, b7650 – произвольные сокращения мышц, b7653 – стереотипные;

– для оценок состояния функций организма: "0" – нет нарушений функции, "1" – легкие, "2" – умеренные, "3" – тяжелые, "4" – абсолютные;

– для функциональных характеристик искусственных стоп и вариантов их оценок: П – подвижность стопы при перекате ("0" – отсутствует, "1" – только в сагиттальной плоскости, "2" – в сагиттальной и фронтальной плоскостях, "3" – в трех плоскостях); Рп – регулировка подвижности стопы ("0" – невозможна, "1" – только в сагит-

тальной плоскости, "2" – в сагиттальной и фронтальной плоскостях, "3" – в трех плоскостях); М – микропроцессорное управление движением стопы ("0" – отсутствует, "1" – имеется); Д – демпфирование переднего толчка ("1" – сниженное – "жесткая пятка", "2" – среднее, "3" – повышенное – "мягкая пятка", "4" – регулируемое); У – упругость заднего толчка ("1" – низкая – "мягкий носок", "2" – средняя, "3" – повышенная – "жесткий носок", "4" – регулируемая); Э – рекуперация энергии ("1" – слабая, "2" – нормальная, "3" – повышенная). Обозначения правил выбора модели стопы: Н – не рекомендуется, Д – допускается, Р – рекомендуется.

Заключение. Матричное представление базы знаний, отражающее правила выбора комплектующих протеза нижней конечности с учетом показателей состояния пациента, является базой для создания системы логических фильтров в

электронном каталоге протезных модулей при персонализированном синтезе протеза.

Матричная модель правил выбора комплекствующих протеза конечности необходима для программистов, занимающихся разработкой системы управления базой данных электронного каталога протезных модулей. Ее применение будет способствовать взаимопониманию между специалистами мультидисциплинарной реабилитационной

бригады, участвующими в реабилитации инвалидов после ампутации конечности в учреждениях медицинского и социального профилей.

Использование понятийного языка МКФ при описании факторов, влияющих на выбор протезных модулей, является шагом по пути формирования цифрового профиля протезируемого, что соответствует стратегии перехода на технологии цифровой медицины.

Список литературы

1. Классификационная система MOBIS. URL: <https://www.ottobock.ru/prosthetics/info-for-new-amputees/mobis-system/> (дата обращения 18.10.2021)
2. РКК "Энергия" – Продукция – Комплекс средств протезирования. URL: <https://www.energia.ru/ru/conversion/prosthetic/prosthetic.html> (дата обращения 18.10.2021)
3. Initial Clinical Evaluation of the Modular Prosthetic Limb / B. N. Perry, C. W. Moran, R. S. Armiger, P. F. Pasquina, J. W. Vandersea, J. W. Tsao // *Front Neurol*. 2018. Vol. 9. P. 153. doi: 10.3389/fneur.2018.00153
4. Lower Limb Prostheses: Measurement Instruments, Comparison of Component Effects by Subgroups, and Long-Term Outcomes / E. M. Balk, A. Gazula, G. Markozannes, H. J. Kimmel, I. J. Saldanha, L. J. Resnik, T. A. Trikalinos // *Rockville (MD): Agency for Healthcare Research and Quality (US)*. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK531523/> (дата обращения 25.10.2021)
5. Measures and procedures utilized to determine the added value of microprocessor-controlled prosthetic knee joints: a systematic review / P. J. Theeven, B. Hemmen, P. R. Brink, R. J. Smeets, H. A. Seelen // *BMC Musculoskelet Disord*. 2013. Vol. 14, art. № 333. doi: 10.1186/1471-2474-14-333
6. Comparisons of Lower Limb Prosthesis Components and Long-Term Continued Use of Prostheses: A Systematic Review / E. Balk, L. Resnik, S. Springs, S. D'Andrea, M. Magill, A. Gazula, M. Di, E. Twomey-Wilson // *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2017. Vol. 98, № 10. P. e135. doi: 10.1016/j.apmr.2017.08.439
7. Saikko V., Shen M. Wear comparison between a dual mobility total hip prosthesis and a typical modular design using a hip joint simulator // *Wear*. 2010. Vol. 268, № 3. P. 617–621. doi: 10.1016/j.wear.2009.10.011
8. The amputee mobility predictor: an instrument to assess determinants of the lower-limb amputee's ability to ambulate / R. S. Gailey, K. E. Roach, E. B. Applegate, B. Cho, B. Cuniffe, S. Licht, M. Maguire, M. S. Nash // *Arch. Phys. Med. Rehabil*. 2002. Vol. 83, № 5. P. 613–627. doi: 10.1053/ampmr.2002.32309
9. World Health Organization: International Classification of Functioning, Disability and Health: ICF. 2001, Geneva: World Health Organization. URL: <https://www.who.int/standards/classifications/international-classification-of-functioning-disability-and-health> (дата обращения 25.10.2021)
10. Madden R. H., Bundy A. The ICF has made a difference to functioning and disability measurement and statistics // *Disability and Rehabilitation*. 2019. Vol. 41, № 12. P. 1450–1462. doi: 10.1080/09638288.2018.1431812
11. Cifu D. X. Braddom's Physical Medicine and Rehabilitation, 6th ed. Philadelphia: Elsevier Health Sciences, 2020. URL: <https://www.elsevier.com/books/braddoms-physical-medicine-and-rehabilitation/cifu/978-0-323-62539-5> (дата обращения 25.10.2021)
12. Variables that Influence Basic Prosthetic Mobility in People With Non-Vascular Lower Limb Amputation / R. Gailey, S. Clemens, J. Sorensen, N. Kirk-Sanchez, I. Gaunaud, M. Raya, G. Klute, P. Pasquina // *PM&R*. 2020. Vol. 12, iss. 2. P. 130–139. <https://doi.org/10.1002/pmrj.12223>
13. The International Classification of Functioning, Disability and Health: a new tool for understanding disability and health / T. B. Üstün, S. Chatterji, J. Bickenbach, N. Kostanjsek, M. Schneider // *Disability and Rehabilitation*. 2003. Vol. 25, № 11–12. P. 565–571. doi: 10.1080/0963828031000137063
14. Kostanjsek N. Use of The International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF) as a conceptual framework and common language for disability statistics and health information systems // *BMC Public Health*. 2011. Vol. 11, № 4. P. S3. doi: 10.1186/1471-2458-11-S4-S3
15. Use of the ICF Model as a Clinical Problem-Solving Tool in Physical Therapy and Rehabilitation Medicine / W. A. Steiner, L. Ryser, E. Huber, D. Uebelhart, A. Aeschlimann, G. Stucki // *Physical Therapy*. 2002. Vol. 82, № 11. P. 1098–1107. doi: 10.1093/ptj/82.11.1098
16. How to use the ICF: A practical manual for using the International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF). URL: <https://www.who.int/classifications/drafticfpracticalmanual2.pdf> (дата обращения 25.10.2021)

Информация об авторах

Смирнова Людмила Михайловна – доктор технических наук (2011), доцент кафедры биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ведущий научный сотрудник отдела биомеханических исследований опорно-двигательной системы Института протезирования и ортезирования ФГБУ ФНЦРИ им. Г. А. Альбрехта Минтруда России. Автор более 170 научных работ. Сфера научных интересов – протезирование; биомеханические исследования; медицинская информатика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: info@diaserv.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4373-9342>

Фогт Елизавета Владимировна – магистр по направлению "Биотехнические системы и технологии" (2019), аспирантка кафедры биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Младший научный сотрудник отдела биомеханических исследований опорно-двигательной системы Института протезирования и ортезирования ФГБУ ФНЦРИ им. Г. А. Альбрехта Минтруда России. Автор 12 научных работ. Сфера научных интересов – протезирование; биомеханические исследования; медицинская информатика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: fogtlisbet11@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1017-6179>

Синегуб Андрей Владимирович – магистр по направлению "Мехатроника и робототехника" (2018), аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого. Младший научный сотрудник отдела биомеханических исследований опорно-двигательной системы Института протезирования и ортезирования ФГБУ ФНЦРИ им. Г. А. Альбрехта Минтруда России. Автор восьми научных публикаций. Сфера научных интересов – протезирование; компьютерное моделирование.

Адрес: ФГБУ ФНЦРИ им. Г. А. Альбрехта, Бестужевская ул., д. 50, Санкт-Петербург, 195067, Россия

E-mail: a.sinegub@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2619-3691>

Солиман Ханади – бакалавр по направлению "Электромеханика – мехатроника" (2018, университет Тишрин, Сирия), магистр по направлению "Биотехнические системы и технологии" (2020), аспирант, ассистент кафедры биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ассистент университета Тишрин. Автор семи научных публикаций. Сфера научных интересов – медицинское приборостроение; медицинская информатика; обработка и анализ биомедицинских сигналов и данных.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: khsoliman@stud.etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9868-8960>

References

1. MOBIS Classification System. Available at: <https://www.ottobock.ru/prosthetics/info-for-new-amputees/mobis-system/> (accessed 18.10.2021) (In Russ.)

2. A Line of Prosthetic Appliances. Available at: <https://www.energia.ru/ru/conversion/prosthetic/prosthetic.html> (accessed 18.10.2021) (In Russ.)

3. Perry B. N., Moran C. W., Armiger R. S., Pasquina P. F., Vandersea J. W., Tsao J. W. Initial Clinical Evaluation of the Modular Prosthetic Limb. *Front Neurol.* 2018, vol. 9, p. 153. doi: 10.3389/fneur.2018.00153

4. Balk E. M., Gazula A., Markozannes G., Kimmel H. J., Saldanha I. J., Resnik L. J., Trikalinos T. A. Lower Limb Prostheses: Measurement Instruments, Comparison of Component Effects by Subgroups, and Long-Term Outcomes. Rockville (MD): Agency for Healthcare Research and Quality (US). Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK531523/> (accessed 25.10.2021)

5. Theeven P. J., Hemmen B., Brink P. R., Smeets R. J., Seelen H. A. Measures and Procedures Utilized to Determine the Added Value of Microprocessor-Controlled Prosthetic Knee Joints: a Systematic Review. *BMC Musculoskelet Disord.* 2013, vol. 14, art. no. 333. doi: 10.1186/1471-2474-14-333

6. Balk E., Resnik L., Springs S., D'Andrea S., Magill M., Gazula A., Di M., Twomey-Wilson E. Comparisons of Lower Limb Prosthesis Components and Long-Term Continued Use of Prostheses: A Systematic Review. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation.* 2017, vol. 98, no. 10, p. e135. doi: 10.1016/j.apmr.2017.08.439

7. Saikko V., Shen M. Wear Comparison Between a Dual Mobility Total Hip Prosthesis and a Typical Modular Design Using a Hip Joint Simulator. *Wear.* 2010, vol. 268, no. 3, pp. 617–621. doi: 10.1016/j.wear.2009.10.011

8. Gailey R. S., Roach K. E., Applegate E. B., Cho B., Cuniffe B., Licht S., Maguire M., Nash M. S. The Amputee Mobility Predictor: an Instrument to Assess Determinants of the Lower-Limb Amputee's Ability to Ambulate. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 2002, vol. 83, no. 5, pp. 613–627. doi: 10.1053/ampr.2002.32309

9. World Health Organization: International Classification of Functioning, Disability and Health: ICF. 2001, Geneva: World Health Organization. Available at: <https://www.who.int/standards/classifications/international-classification-of-functioning-disability-and-health> (accessed 25.10.2021)

10. Madden R. H., Bundy A. The ICF Has Made a Difference to Functioning and Disability Measurement and Statistics. *Disability and Rehabilitation.* 2019, vol. 41, no. 12, pp. 1450–1462. doi: 10.1080/09638288.2018.1431812

11. Cifu D. X. Braddom's Physical Medicine and Rehabilitation, 6th ed. Philadelphia: Elsevier Health Sciences, 2020. Available at: <https://www.elsevier.com/books/braddom-physical-medicine-and-rehabilitation/cifu/978-0-323-62539-5> (accessed 25.10.2021)

12. Gailey R., Clemens S., Sorensen J., Kirk-Sanchez N., Gaunaud I., Raya M., Klute G., Pasquina P. Variables that Influence Basic Prosthetic Mobility in People With Non-

Vascular Lower Limb Amputation. *PM&R.* 2020, vol. 12, iss. 2, pp. 130–139. <https://doi.org/10.1002/pmrj.12223>

13. Üstün T. B., Chatterji S., Bickenbach J., Kostanjsek N., Schneider M. The International Classification of Functioning, Disability and Health: a New Tool for Understanding Disability and Health. *Disability and Rehabilitation.* 2003, vol. 25, no. 11–12, pp. 565–571. doi: 10.1080/0963828031000137063

14. Kostanjsek N. Use of The International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF) as a Conceptual Framework and Common Language for Disability Statistics and Health Information Systems. *BMC Public Health.* 2011, vol. 11, no. 4, p. S3. doi: 10.1186/1471-2458-11-S4-S3

15. Steiner W. A., Ryser L., Huber E., Uebelhart D., Aeschlimann A., Stucki G. Use of the ICF Model as a Clinical Problem-Solving Tool in Physical Therapy and Rehabilitation Medicine. *Physical Therapy.* 2002, vol. 82, no. 11, pp. 1098–1107. doi: 10.1093/ptj/82.11.1098

16. How to use the ICF: A Practical Manual for Using the International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF). Available at: <https://www.who.int/classifications/drafticfpracticalmanual2.pdf> (accessed 25.10.2021)

Information about the authors

Ludmila M. Smirnova, Dr Sci. (Eng.) (2011), Associative Professor at the Department of Bioengineering systems of Saint Petersburg Electrotechnical University, Senior Research Scientist of the Division of biomechanical research of locomotor system at Albrecht Federal Scientific Centre of Rehabilitation of the Disabled. The author of more than 300 scientific publications. Area of expertise: information-measuring systems; medical informatics; biomechanical research; rehabilitation of disabled people.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: info@diaserv.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4373-9342>

Elizaveta V. Fogt, Master in Bioengineering Systems and Technologies (2019), post-graduate student of Department of Bioengineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. Junior Research Scientist at the Division of biomechanical research of locomotor system at Albrecht Federal Scientific Centre of Rehabilitation of the Disabled. The author of 12 scientific publications. Area of expertise: prosthetics; biomechanical research; medical informatics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: fogtlisbet11@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1017-6179>

Andrey V. Sinegub, postgraduate student in Mechatronics and robotics of Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University. Junior Research Scientist at the Division of biomechanical research of locomotor system at Albrecht Federal Scientific Centre of Rehabilitation of the Disabled. The author of 8 scientific publications. Area of expertise: prosthetics, computer modelling.

Address: Albrecht Federal Scientific Centre of Rehabilitation of the Disabled, 50, Bestuzhevskaya St., St Petersburg 195067, Russia

E-mail: a.sinegub@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2619-3691>

Hanadi Solieman, Bachelor in Electromechanics – Mechatronics (2018, Tishreen University, Syria), Master in Bioengineering Systems and Technologies (2019), post-graduate student, assistant of the Department of Bioengineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. Assistant at the Mechatronics program for Distin-guished at Tishreen University. The author of 7 scientific publications. Area of expertise: medical instrumentation, medical informatics, processing and analysis of biomedical signals and data.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: khsoliman@stud.etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9868-8960>

Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий

УДК 537.29

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-1-64-74>

Расчет значений рабочих напряжений для безотказной работы электростатического измерителя направления малых отклонений

Н. С. Пщелко¹, О. С. Царёва^{2✉}

¹ Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного,
Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ tsareva_os@spbstu.ru

Аннотация

Введение. Для контроля положения конструкций и грунтового массива используют периодические геодезические наблюдения. Поскольку наиболее опасным видом деформации здания является крен, рассмотрены существующие методы его определения. На начальном этапе при обнаружении крена для своевременного принятия превентивных мер важна информация не столько о величине крена, сколько о его направлении. Поэтому задача определения направления отклонения от вертикали при малых углах отклонений является актуальной. Для повышения чувствительности рассматриваемого измерительного устройства предлагается использовать силовое действие электрического поля.

Цель работы. Расчет значений электрических напряжений, обеспечивающих надежную работу рассматриваемого устройства в зависимости от его геометрических размеров и характеристик применяемых материалов.

Материалы и методы. В устройстве используются проводящие, полупроводящие и диэлектрические материалы. Расчет основан на анализе сил, действующих на вертикально подвешенный груз в присутствии электрического поля. Рассматриваются условия равновесия и неустойчивости положения груза, возникающего за счет сильной положительной обратной связи в электрическом поле.

Результаты. Выполнен расчет, позволяющий обеспечить обоснованный выбор геометрических и электрофизических характеристик разработанного устройства. Получена формула для значений используемых электрических напряжений, обеспечивающих его безотказную работу. Рассчитанные значения искомых напряжений оказались приемлемыми для практических применений. Предложены основные элементы конструкции устройства и один из возможных способов регистрации информационного сигнала.

Заключение. Разработанное устройство в условиях неустойчивости положения груза в достаточно сильном электрическом поле отличается тем, что позволяет измерять направление отклонения даже при его значении, стремящемся к нулю. В то же время при таких малых отклонениях становятся существенными неточность изготовления устройства и влияние случайных факторов. В работе предложены способы решения этих проблем.

Ключевые слова: деформации, крен, электрическое поле, электростатические силы, неустойчивое равновесие

Для цитирования: Пщелко Н. С., Царёва О. С. Расчет значений рабочих напряжений для безотказной работы электростатического измерителя направления малых отклонений // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 1. С. 64–74. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-64-74

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы благодарят ведущего специалиста центра интеллектуальной собственности и трансфера технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого Краснова Бориса Вячеславовича за помощь в оформлении патентов по теме работы.

Статья поступила в редакцию 23.12.2021; принята к публикации после рецензирования 28.01.2022; опубликована онлайн 28.02.2022

Calculation of Voltages Ensuring Trouble-Free Operation of an Electrostatic Meter of the Direction of Small Angle Tilts

Nikolay S. Pshchelko¹, Olga S. Tsareva²✉

¹ Military Telecommunications Academy, St Petersburg, Russia

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St Petersburg, Russia

✉ tsareva_os@spbstu.ru

Abstract

Introduction. Periodic geodetic observations are used to control the position of building structures and soil massifs. Since tilt is considered to be one of the most dangerous types of building deformations, this paper considers existing methods for its determination. When a horizontal displacement (tilt) is detected, it is of particular importance to assess not so much its angle but its direction. This allows preventive measures to be timely enforced. Therefore, determination of the direction of horizontal displacements at small tilt angles presents a relevant research problem. In order to increase the sensitivity of the considered measuring device, it is proposed to use the action of electric field.

Aim. Calculation of electrical voltages that ensure reliable operation of the device under consideration, depending on its geometric dimensions and characteristics of the materials used.

Materials and methods. The device was made of conductive, semi-conductive and dielectric materials. Calculations were based on an analysis of forces acting on a vertically suspended load in the presence of electric field. The conditions of equilibrium and instability of the position of the load arising due to strong positive feedback in electric field were considered.

Results. Calculations were performed to support a reasonable choice of geometric and electrophysical characteristics of the developed device. A formula was obtained for the values of electrical voltages that could ensure trouble-free operation of the device. The calculated values of operating voltages were found to be acceptable for practical application. The main structural elements of the device and one of the possible methods for registering information signals were proposed.

Conclusion. Due to the instable position of the load in a sufficiently strong electric field, the developed device allows the direction of displacements to be measured even when their values tend to zero. This makes the developed device promising for practical application. However, it should be noted that, under such small displacements, the accuracy of the device depends on the manufacturing conditions and random factors.

Keywords: deformations, tilt, electric field, electrostatic forces, unstable equilibrium

For citation: Pshchelko N. S., Tsareva O. S. Calculation of Voltages Ensuring Trouble-Free Operation of an Electrostatic Meter of the Direction of Small Angle Tilts. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 1, pp. 64–74. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-64-74

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgments. The authors are grateful to expert of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Boris V. Krasnov for assistance in obtaining patents on the topic of work.

Submitted 23.12.2021; accepted 28.01.2022; published online 28.02.2022

Введение. Как известно, для контроля положения конструкций и грунтового массива используют периодические геодезические наблюдения. Поскольку наиболее опасным видом деформации здания является крен – отклонение объекта или его элементов от вертикали, рассмотрим существующие методы его определения.

В [1] исследуют деформации земной поверхности с использованием метода конечных элементов.

В [2] представлен разработанный недорогой прототип IATS, состоящий из инструмента RTS Leica TPS1201 и камеры GoPro Hero5 для исследования мостов под нагрузкой. В [3] рассматривается метод непрерывного мониторинга трещин в режиме реального времени, основанный на массиве датчиков на волоконной брэгговской решетке (ВБР), для мониторинга усталостных трещин в конструкциях из алюминиевых сплавов, находящихся в эксплуатации.

Расчет значений рабочих напряжений для безотказной работы
электростатического измерителя направления малых отклонений
Calculation of Voltages Ensuring Trouble-Free Operation
of an Electrostatic Meter of the Direction of Small Angle Tilts

В [4] авторы предлагают использование ультразвуковых датчиков для определения наклона зданий.

В [5] авторы предлагают использовать такие датчики, как тензодатчик, акселерометр и датчик вибрации, для непрерывного наблюдения за зданиями и использовать создание системы оповещения потребителей посредством Глобальной системы мобильной связи (GSM).

В [6] обсуждаются точность и функциональные аспекты оригинального инклинометра, разработанного и усовершенствованного авторами. Принцип работы устройства основан на использовании оптических волокон, проецировании света и его обнаружении на объективе ПЗС-камеры.

Отклонения от прямолинейности на всей длине элемента определяют: при помощи струны на опорах равной высоты, задающей линию отсчета, и линейки; при помощи поверочной линейки или контрольной рейки на опорах равной высоты, задающих линию отсчета, и линейки, индикатора или щупа; нивелира или теодолита, задающего линию отсчета, и линейки [7].

Также для измерения смещений отдельных участков грунтового массива или вертикально заглубленных конструкций (стен в грунте, свай, баррет и др.) применяют метод инклинометрии. При этом значение и направление горизонтального смещения определяют по приращениям угла наклона скважины или трубы, помещенной в конструкцию, за промежуток времени между циклами наблюдений [7].

Одним из видов деформаций является крен – наиболее характерный показатель общей деформации высокого сооружения. Существует значительное количество способов определения крена высоких зданий и сооружений башенного типа: по разности отметок осадочных марок; способ вертикального проектирования; способ измерения горизонтальных углов; способ определения произвольных направлений или магнитных азимутов; способ определения прямоугольных координат (способ засечек). Из других менее известных способов определения крена можно отметить способ малых углов, способ горизонтальных и вертикальных углов, способ фоторегистрации, способ одного опорного пункта, различные способы использования приборов вертикального проектирования. Известны предложения по использованию наклономеров, маятниковых кренометров, систем видеоизмерения, телевидения, GPS-приемников и электронных тахеометров [7]. Рассмотрим некоторые из них.

В способе нивелирования на цоколе здания устанавливают не менее четырех осадочных марок, после измерения осадок которых проводят линии равных осадок и вычисляют значение прироста крена ΔK сооружения:

$$\Delta K = \frac{\Delta S H}{D},$$

где ΔS – максимальная разность осадок по диаметру сооружения; H – высота сооружения; D – диаметр сооружения.

Ошибка определения прироста крена данным способом составляет в среднем 1 см при определении разности осадок с точностью до 1 мм.

В способе вертикального проецирования наклонным визирным лучом теодолита/тахеометра проецируют верхнюю точку сооружения, например, на горизонтальную рейку, закрепленную внизу сооружения. Периодически снося эту точку вниз и отмечая ее проекции, определяют увеличение крена от цикла к циклу.

Способ горизонтальных углов предусматривает наблюдения верхней точки сооружения с двух закрепленных на местности опорных точек в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Если с опорных точек можно наблюдать верхнюю и нижнюю точки сооружения, которые по техническим условиям должны находиться на одной отвесной линии (например, вертикальное ребро сооружения или колонны), то по разности измеренных горизонтальных углов получают полную величину крена.

Способ направлений заключается в определении произвольных направлений или магнитных азимутов, например, на образующую дымовой трубы в верхнем и нижнем (или верхнем, нижнем и промежуточных) ее сечениях.

Способ координат заключается в определении прямой однократной или многократной засечкой координат хорошо заметной точки наверху сооружения. Для этого с геодезических пунктов с известными координатами периодически измеряют горизонтальные углы между направлениями на опорные пункты и направлением на точку сооружения и вычисляют координаты x и y этой точки. По разности координат между начальным и последующими циклами наблюдений находят величину и направление крена за истекший период.

В [8] рассматривается датчик наклона на основе твердотельного акселерометра, который позволяет определить угол относительно плоскости Земли с точностью до 0.5° в двух плоскостях.

Описанные устройства не всегда возможно использовать для определения степени и направления деформаций, в частности, ввиду наличия строительных лесов на объекте. Поэтому возникла идея использовать устройство, обладающее минимальными размерами и высокой чувствительностью для определения степени деформаций (в частности, отклонений) тех элементов конструкций, которые недоступны для наблюдения традиционными геодезическими методами. Наиболее опасным видом деформации здания является крен. На начальном этапе при обнаружении крена для своевременного принятия необходимых мер по предотвращению его усиления важна информация не столько об абсолютном значении крена, сколько о его направлении. Поэтому задача определения направления отклонения от вертикали при малых углах отклонений является актуальной. Для повышения чувствительности рассматриваемого измерительного устройства предлагается использовать силовое действие электрического поля. Следует отметить, что действие электрического поля широко используется в различного рода датчиках [9–12]. При небольших межэлектродных зазорах электростатические силы могут оказаться настолько велики, что приведут к необратимому "склеиванию" электродов [13]. Однако для целей, рассматриваемых в контексте описываемой работы, электрическое поле ранее не применялось. В то же время возможность получения с его помощью достаточно больших сил совместно с эффектом неустойчивости открывает интересные перспективы его использования.

В [14, 15] было показано, что использование электростатических сил позволяет эффективно определять направление малых отклонений, что очень важно для принятия соответствующих превентивных мер, например на начальном этапе деформации зданий. Соответствующий материал был опубликован в [15]. При этом, однако, не был приведен расчет, позволяющий выбирать технические характеристики рассмотренного устройства (в частности, значение рабочего электрического напряжения), которые бы обеспечивали его надежную работу.

В связи с этим целью описываемой работы является выполнение расчета, обеспечивающего обоснованный выбор геометрических и электрофизических характеристик разработанного устройства.

Для понимания дальнейшего изложения необходимо кратко напомнить основные сведения о разработанном в [14, 15] устройстве.

Расчет значений рабочих напряжений для безотказной работы электростатического измерителя направления малых отклонений
Calculation of Voltages Ensuring Trouble-Free Operation of an Electrostatic Meter of the Direction of Small Angle Tilts

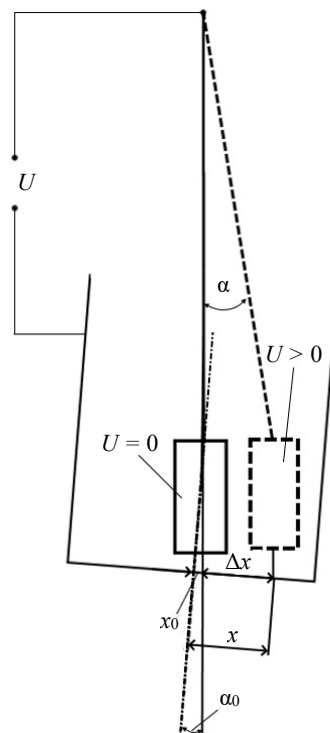


Рис. 1. Груз на нити в цилиндре при отсутствии электрического поля между грузом и стенками цилиндра и при наличии поля за счет подачи электрического напряжения U

Fig. 1. A load on a thread in a cylinder in the absence of electric field between the load and the walls of the cylinder and in the presence of electrical field due to the supply of electric voltage U

Методы. При определении направления угла малых отклонений от вертикали или горизонтали можно использовать цилиндр – груз, подвешенный на нити в круглом полном цилиндре – трубе, дно которой строго перпендикулярно стенкам (рис. 1). При очень небольшом (единицы секунд) наклоне дна нить становится не параллельна стенкам и образует с ними угол α_0 , значение которого настолько мало, что зафиксировать его и определить направление отклонения известными методами затруднительно. Для улучшения качества измерений (определения направления отклонения) в описываемой работе предлагается создать электрическое поле между цилиндрическим грузом и стенками цилиндра [14]: для этого достаточно, чтобы указанные элементы были электропроводящими или полупроводящими и изолированными друг от друга, и через электропроводящую нить подать на цилиндр и груз электрическое напряжение U . При небольших межэлектродных промежутках силовое действие электрического поля может оказаться значительным даже при использовании относительно не-

больших напряжений. При отклонении груза относительно стенок цилиндра вследствие внешних деформаций контролируемого объекта даже при очень небольшом значении α_0 расстояние между грузом и стенкой цилиндра в направлении отклонения уменьшится, а в противоположном направлении – увеличится. Это приведет к тому, что электростатическая сила притяжения в направлении отклонения возрастет, а в противоположном – уменьшится. Следовательно, груз еще больше отклонится в направлении первоначального отклонения. Таким образом, образуется положительная обратная связь – угол отклонения будет увеличиваться именно в направлении исходного отклонения, и продолжаться это будет до тех пор, пока угол не достигнет относительно большого и поэтому легко измеряемого значения α , обусловленного балансом результирующей электростатической силы и возвращающей силы, возникающей при отклонении груза на нити от вертикали за счет гравитации. Следует отметить, что если приложенное электрическое напряжение достаточно велико, то возвращающая сила может и не скомпенсировать электростатические силы. В этом случае отклонение будет продолжаться до тех пор, пока груз не коснется стенки цилиндра в направлении отклонения. Фиксируя положение этой точки, легко определить направление отклонения. Именно такой подход (использование достаточно большого напряжения) оказался на практике наиболее удобным.

Количественно представленная ситуация была рассмотрена в [15]. Предлагаемое устройство предназначено для определения направления отклонений при малых (на практике – измеряемых в секундах) углах. Углы отклонения нити, соответственно, имеют тот же порядок (рис. 1). Поэтому можно считать, что груз даже при отклонении остается расположенным приблизительно параллельно стенкам трубы-цилиндра (рис. 2). Таким образом, с учетом указанного, для расчета полей и электростатических сил будем использовать приближение плоского конденсатора.

На рис. 2 показана принятая в [15] для расчета модель. Обозначения согласованы с рис. 1. Пунктиром показано исходное положение при строго горизонтальном расположении дна трубы, штрихпунктирной линией – положение груза при небольшом наклоне дна трубы, штриховой линией – равновесное положение при подаче электрического напряжения между грузом и трубой.

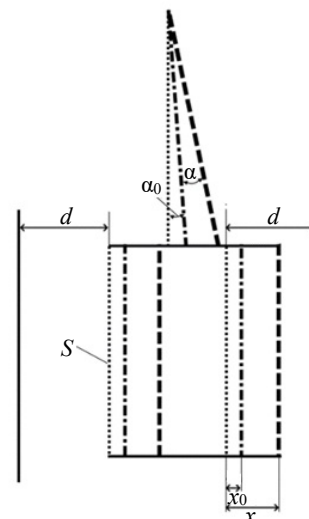


Рис. 2. Модель для расчета влияния электрического поля на отклонение груза в системе отсчета, связанной со стенками трубы-цилиндра

Fig. 2. A model for calculating the effect of electric field on the deflection of a load in a frame of reference associated with the walls of a pipe-cylinder

В действительности груз и стенки при наклоне трубы становятся не строго параллельны. Однако, поскольку углы отклонения малы, не будем учитывать это обстоятельство. Поэтому под указанными на рис. 2 расстояниями подразумеваются их средние значения (для упрощения расчета).

Электростатическая сила F_e рассчитывается по формуле

$$F_e = p_{\Sigma} S, \quad (1)$$

где p_{Σ} – результирующее пондеромоторное давление; S – тянущая площадь. При этом

$$p = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E^2, \quad (2)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная; ϵ – диэлектрическая проницаемость среды между грузом и трубой; E – напряженность электрического поля, которую можно оценить как

$$E = \frac{U}{z}. \quad (3)$$

Здесь z – расстояние (зазор) между электродами, находящимися под напряжением.

Учтем, что на груз за счет электрического поля действует результирующая разность двух сил: одна направлена вправо, где зазор меньше; вторая – влево, где зазор при отклонении в рассматриваемом

мом направлении становится больше (рис. 2). На основе (1)–(3) для результирующей электростатической силы F_e можно записать:

$$F_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon \frac{U^2}{(d-x)^2} S - \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon \frac{U^2}{(d+x)^2} S,$$

где d – начальный зазор между стенкой трубы и грузом (до отклонения); x – отклонение груза от исходного положения, вызываемое совместным действием внешнего крена (x_0) и электростатическими силами.

После упрощения выражение для электростатической силы приобретает вид

$$F_e = 2\varepsilon_0 \varepsilon S U^2 \frac{dx}{(d^2 - x^2)^2}. \quad (4)$$

Будем считать, что рассчитанная сила направлена горизонтально (вправо на рис. 2). В результате отклонения под ее действием возникает возвращающая сила F_g , представляющая собой векторную сумму силы тяжести, действующей на груз, и сил натяжения нити и Архимеда (для создания демпфирования груз находится в цилиндре, заполненном жидкостью). В этом случае

$$F_g = P \operatorname{tg} \alpha,$$

где P – вес груза, равный разности сил тяжести и Архимеда, действующих на него:

$$P = mg - \rho g V. \quad (5)$$

Здесь m – масса груза; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность жидкости, в которой находится груз; V – объем груза. В качестве такой жидкости представляется целесообразным использовать трансформаторное масло для повышения электрической прочности среды и создания демпфирования, препятствующего раскачиванию груза.

С учетом (5), а также того, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x - x_0}{l},$$

где x – значение отклонения груза после подачи напряжения; x_0 – значение малого отклонения, появляющегося без использования напряжения; l – длина нити вместе с грузом, выражение для компенсирующей силы примет вид

$$F_g = (mg - \rho g V) \frac{x - x_0}{l}. \quad (6)$$

В результате баланса сил (4) и (6) груз отклоняется на заметный угол α . Для определения значения отклонения x необходимо приравнять (4) и (6) и решить относительно x соответствующее уравнение. При этом в зависимости от значения используемого напряжения возможны различные ситуации, связанные с устойчивостью положения груза.

Результаты. Рассмотрим результаты расчета в зависимости от значения приложенного напряжения.

1. Приложенное напряжение невелико и, соответственно, электростатическая сила F_{e1} также невелика, т. е. при появлении отклонения возникающая возвращающая сила будет больше электростатической (рис. 3). В этом случае имеются 2 корня – x_s и x_n (соответственно для устойчивого и неустойчивого равновесия груза). Очевидно, в рассмотренном устройстве реализуется устойчивое состояние, так как в начале движения, при малых x , электростатическая сила больше возвращающей.

2. Приложенное напряжение имеет некоторое критическое значение U_k , соответствующее границе устойчивости груза, т. е. когда x_s и x_n практически совпадают и даже при небольшом случайном отклонении в сторону стенки трубы произойдет необратимое движение груза к этой стенке вплоть до ее касания. При этом сила F_{e2} больше, чем в предыдущем случае. Для расчета значения U_k и соответствующей координаты x_k

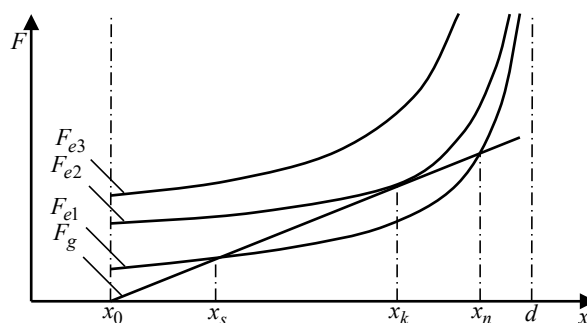


Рис. 3. Электростатические F_e и возвращающая F_g силы при $x_0 \neq 0$ в зависимости от смещения x груза от исходного положения. Соответствующие электрические напряжения $U_3 > U_2 > U_1$

Fig. 3. Electrostatic F_e and restoring F_g forces at $x_0 \neq 0$ depending on the displacement x of the load from the initial position. The corresponding electrical voltages are $U_3 > U_2 > U_1$

необходимо, как видно из рис. 3, равенство сил (4) и (6) дополнить равенством их производных:

$$\begin{cases} F_e = F_g; \\ \frac{dF_e}{dx} = \frac{dF_g}{dx}. \end{cases}$$

3. Приложенное напряжение велико и возникающая электростатическая сила при любом x больше возвращающей силы. В этом случае груз неминуемо коснется стенки трубы. При этом он будет двигаться в направлении первоначального отклонения. Как уже указывалось, этот вариант удобно использовать для определения направления отклонения, так как в рассматриваемом случае это отклонение, очевидно, максимально.

4. Напряжение приложено при очень малом значении x_0 , т. е. $x_0 \rightarrow 0$, что по сути и соответствует очень малому трудно измеряемому отклонению. Именно эта ситуация и является основным предметом рассмотрения в описываемой работе. В этом случае поведение сил в предлагаемом устройстве будет несколько отличаться от ситуации, показанной на рис. 3. Ситуацию при $x_0 \rightarrow 0$ иллюстрирует рис. 4. Видно, что при совсем небольших электрических напряжениях типа U_0 и U_1 , когда возникающая в результате отклонения возвращающая сила будет больше электростатической, движение груза к стенке трубы не начнется, так как очевидно, что для начала движения должна преобладать сила, направленная к стенке цилиндра. Положение равновесия может быть достигнуто лишь искусственным

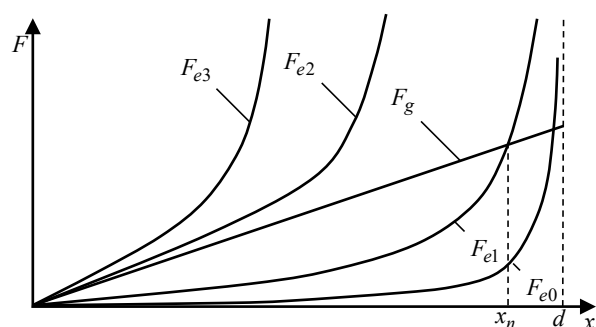


Рис. 4. Электростатические F_e и возвращающая F_g силы при $x_0 \rightarrow 0$ в зависимости от смещения x груза от исходного положения. Соответствующие электрические напряжения $U_3 > U_2 > U_1 > U_0$

Fig. 4. Electrostatic F_e and restoring F_g forces at $x_0 \rightarrow 0$ depending on the displacement x of the load from the initial position. The corresponding electrical voltages $U_3 > U_2 > U_1 > U_0$

приближением груза к стенке. Из рис. 4 видно, что положение равновесия при этом будет неустойчивым – при случайном отклонении груза возникающая результирующая сила будет направлена в сторону отклонения. Поэтому указанные значения напряжения не представляют практического интереса. При необходимости можно рассчитать рассмотренное положение равновесия x_n , приравнявая (4) и (6) при $x_0 \rightarrow 0$. Соответствующие расчеты дают следующий результат:

$$x_n = \sqrt{d^2 - \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon S U^2 dl}{mg - \rho g V}}}. \quad (7)$$

На первый взгляд, полученная формула выглядит ошибочной – при увеличении прикладываемого напряжения координата, соответствующая равновесному положению, уменьшается. Однако (7) полностью соответствует показанной на рис. 4 ситуации для малых напряжений, и указанное несоответствие объясняется тем, что это положение само, только под действием напряжения, не достигается. В связи с этим, как уже отмечалось, расчет x_n большого практического значения не имеет.

Практическое значение имеет ситуация, в которой устанавливается равновесие или происходит "залипание" груза на стенку естественным образом, только под действием возникающих в системе сил. Для безотказной работы предлагаемого устройства представляют интерес ситуации, соответствующие напряжениям U_2 и U_3 (рис. 4). При этих напряжениях электростатическая сила больше возвращающей во всем диапазоне координат, что неминуемо вызовет движение груза и его гарантированное касание стенки трубы в направлении отклонения. Наибольший интерес представляет пограничная ситуация – напряжение $U_2 = U_{kk}$, где U_{kk} – критическое значение напряжения, аналогичное по физическому смыслу U_k , рассмотренному в п. 2, но относящееся к ситуации $x_0 \rightarrow 0$, т. е. очень малому отклонению, направление которого зафиксировать известными методами невозможно.

Для расчета значения U_{kk} заметим, что графики F_{e2} и F_g в окрестности $x = 0$ имеют общую касательную, поэтому производные от этих функций по x должны быть равны в окрестности

нуля. Производная от (4) после преобразований сводится к виду

$$\frac{dF_e}{dx} = 2\varepsilon_0 \varepsilon S U^2 d \frac{d^2 + 3x^2}{(d^2 - x^2)^3}. \quad (8)$$

Производная от (6):

$$\frac{dF_g}{dx} = \frac{mg - \rho g V}{l}. \quad (9)$$

Приравнявая (8) и (9) при $x = 0$ и учитывая, что при этом $U = U_{kk}$, после преобразований получим для U_{kk} сравнительно простое выражение, связывающее его значение с параметрами предлагаемого устройства:

$$U_{kk} = \sqrt{\frac{(mg - \rho g V) d^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon S l}}. \quad (10)$$

Оценка значений по (10) была выполнена в [15], где приводилась без вывода. Оценим количественно рассчитанное значение, приняв к расчету реальные, легко реализуемые значения величин, входящих в (10). Для этого примем вес груза $mg - \rho g V = 0.1$ Н. Отметим, что вес груза и значение тянущей площади можно варьировать, делая груз частично полым. Исходный зазор d примем равным 0.3 мм. Остальные значения примем следующими: $\varepsilon = 2.5$; $S = 10$ см²; $l = 10$ см. При указанных значениях расчет по (10) дает 24.7 В. Такое напряжение может быть легко реализовано даже от автономных источников питания с учетом того, что потребляемый ток очень мал.

Один из вариантов регистрации измерительного сигнала заключается в измерении картины распределения электрических потенциалов на наружной поверхности трубы-цилиндра и фиксации протекающих токов в момент касания грузом ее внутренней поверхности. Если стенки трубы-цилиндра тонкие и полупроводящие, то потребляемый ток, измеренный при подключении к точке на наружной поверхности трубы, соответствующей месту касания с грузом, будет наибольшим.

В простейшем варианте в качестве сигнальных элементов можно использовать светодиоды. В приведенном на рис. 5 примере ярче остальных при касании грузом стенки загорится 11-й светодиод, так как электрическое сопротивление между грузом и стенкой трубы будет наименьшим в

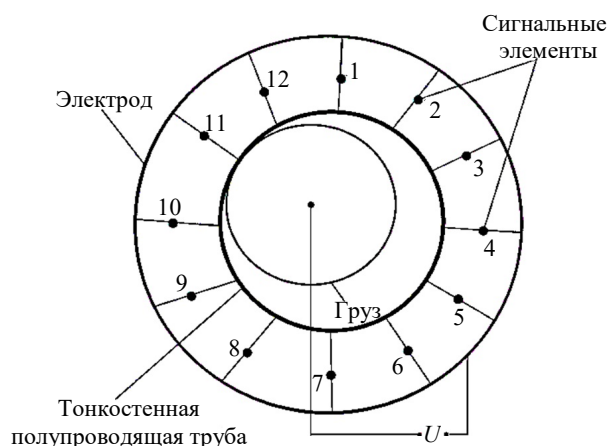


Рис. 5. Схема измерения направления отклонения (вид сверху). 1–12 – сигнальные элементы, реагирующие на появление тока в них

Fig. 5. A diagram for measuring the direction of displacement (top view). 1–12 – signal elements that respond to the flowing current

точке касания, куда подведен внутренний электрод именно 11-го светодиода.

При анализе работы предлагаемого измерителя была рассмотрена идеализированная ситуация: считалось, что устройство изготовлено абсолютно точно и поэтому расстояния от внешней поверхности груза до всех точек внутренней поверхности цилиндра до отклонения в точности равны. Не учитывалось также влияние вибраций и случайных факторов, приводящих к неконтролируемому отклонению груза. Такая модель вполне приемлема при определенных обстоятельствах и необходима для получения количественных оценок по значениям рабочих напряжений. В то же время из принципа работы устройства понятно, что в нем имеется сильная положительная обратная связь и случайное отклонение от вертикали приведет в дальнейшем к отклонению именно в эту сторону. Это обстоятельство становится особенно существенным при измерении малых отклонений. Конечно, данное устройство, как и любое другое, имеет конечную точность измерений, ограниченную технологией его изготовления и влиянием внешних факторов. Однако это не означает, что рассмотренное устройство на практике будет не работоспособным – необходимо правильно его использовать. Во-первых, вибрации можно минимизировать за счет массы груза и сильного демпфирования (поместить груз в цилиндр с вязкой диэлектрической жидкостью). На статическое отклонение, вызываемое длительным действием силы тяжести, это не повлияет. Скорее всего, по сравнению с действием силы тяжести даже при

вызываемом ею малом отклонении влиянием вибраций можно будет пренебречь. Во-вторых, при измерениях можно использовать следующий прием: даже если устройство изготовлено не идеально, в начале измерений тонкой регулировкой положения плоскости, на которой оно установлено, можно подобрать такое ее положение, что груз как раз за счет сильной положительной обратной связи будет среднестатистически равновероятно отклоняться во всех направлениях. Случайные факторы не имеют какого-то предпочтительного направления действия. Таким образом, необходимо провести много предварительных измерений и проделать большую подготовительную работу. Найденное положение следует принять за исходное. Далее, в результате отклонения, вызываемого, например, наклоном здания, появится небольшое, но определенного направления отклонение груза. При этом даже если это отклонение меньше и без того малых случайных отклонений, при выполнении большого количества измерений обнаружится корреляционная связь между направлением отклонения и показаниями измерителя в пользу искомого направления отклонения.

Выводы. Разработанное устройство позволяет измерять направление отклонения даже при его значении, стремящемся к нулю, в условиях неустойчивости положения груза в достаточно сильном электрическом поле. Этим рассмотренное устройство принципиально отличается от других измерительных устройств того же функционального назначения, чувствительность которых падает с уменьшением значения отклонения, что обусловлено физическими основами их работы. Рассчитанные значения рабочих напряжений, обеспечивающих безотказную работу устройства, оказались приемлемыми для практических применений.

При определении направления особенно малых отклонений, когда на результат измерений будут влиять неточность изготовления устройства и случайные факторы, вызывающие отклонения груза, необходимо принять описанные ранее предварительные меры по "настройке" устройства, а кроме того, судить о результатах измерения направления крена не по единичному измерению, а по результатам серии измерений.

Список литературы

1. Analysis of rockburst driving mechanism based on unbalanced force / C. Y. Li, F. S. Xie, P. X. Qin, Y. Zhang, Q. Yang, Y. R. Liu, Z. S. Li // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 861, № 3. № 032047. doi: 10.1088/1755-1315/861/3/032047
2. Vibration monitoring of civil engineering structures using contactless vision-based low-cost iats prototype / R. Paar, A. Marendić, I. Jakopc, I. Grgac // Sensors. 2021. Vol. 21, № 23. № 7952. doi: 10.3390/s21237952
3. Fatigue Crack Prediction Method for Aluminum Alloy Based on Fiber Bragg Grating Array / L. Sun, C. Liu, M. Jiang, L. Zhang, F. Zhang, Q. Sui, L. Jia // Chinese J. of Lasers. 2021. Vol. 48, № 13. № 1306003. doi: 10.3788/CJL202148.1306003
4. Ultrasonic sensors enabling early detection of emergency trends and analysis of structure inclination and stability by means of highly accurate level measurements / L. Ornoch, P. Popielski, A. Olszewski, A. Kasprzak // Sensors. 2021. Vol. 21, № 5. P. 1–14. doi: 10.3390/s21051789
5. Sivagami A., Jayakumar S., Kandavalli M. A. Structural health monitoring using smart sensors // AIP Conf. Proc. 2020. Vol. 2281. № 020034. doi: 10.1063/5.0026292
6. Accuracy and functional assessment of an original low-cost fibre-based inclinometer designed for structural monitoring / K. Ćmielewski, K. Karsznia, J. Kuchmister, P. Gołuch, I. Wilczyńska // Open Geosci-ences. 2020. Vol. 12, № 1. P. 1052–1059. doi: 10.1515/geo-2020-0171
7. Шеховцов Г. А., Шеховцова Р. П. Современные геодезические методы определения деформаций инженерных сооружений / ННГАСУ. Н. Новгород, 2009. 156 с.
8. Бузыкканов С. Датчик наклона на основе твердотельного акселератора // Современная электроника. Схемные решения. 2004. С. 42–45.
9. Давыдов С. Ю., Мошников В. А., Федотов А. А. Адсорбция газов на полупроводниковых оксидах: изменение работы выхода // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30, № 17. С. 39–44.
10. Анализ локальных областей полупроводниковых нанообъектов методом туннельной атомно-силовой микроскопии / Н. А. Лашкова, Н. В. Пермьяков, А. И. Максимов, Ю. М. Спивак, В. А. Мошников // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Физ.-мат. науки. 2015. Т. 213, № 1. С. 31–42. doi: 10.5862/JPM.213.3
11. Мошников В. А., Максимов А. И. Наночастицы, наносистемы и их применение // Сенсорика, энергетика, диагностика. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2020. 280 с.
12. Налимова С. С., Мякин С. В., Мошников В. А. Управление функциональным составом поверхности и улучшение газочувствительных свойств металло-оксидных сенсоров посредством электронно-лучевой обработки // Физика и химия стекла. 2016. Т. 42, № 6. С. 773–780.

13. Pshchelko N. S., Sevryugina M. P. Modeling of physical and chemical processes of anodic bonding technology // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1040. P. 513–518. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.513

14. Пат. RU 201631 U1 G01C 9/00 (2006.01). Устройство для определения направления малых

отклонений / Н. С. Пщелко, О. С. Царева. Опубл. 24.12.2020. Бюл. № 36.

15. Пщелко Н. С., Царева О. С. Физические основы использования электрического поля для повышения точности определения направления малых углов отклонений // *Прикладная физика*. 2021. № 3. С. 60–65. doi: 10.51368/1996-0948-2021-3-60-65

Информация об авторах

Пщелко Николай Сергеевич – доктор технических наук (2011), доцент (1997), профессор кафедры физики Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – электрофизические процессы в материалах и структурах.

Адрес: Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Тихорецкий проспект, д. 3, Санкт-Петербург, 194064, Россия.

E-mail: nikolsp@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5545-0461>

Царёва Ольга Сергеевна – кандидат технических наук (2020), доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства Инженерно-строительного института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – деформации; объекты культурного наследия; приборы для измерения наклонов.

Адрес: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Политехническая ул, д. 29, Санкт-Петербург, 195220, Россия

E-mail: tsareva_os@spbstu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1009-1052>

References

1. Li C. Y., Xie F. S., Qin P. X., Zhang Y., Yang Q., Liu Y. R., Li Z. S. Analysis of Rockburst Driving Mechanism Based on Unbalanced Force. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 861, no. 3, № 032047. doi: 10.1088/1755-1315/861/3/032047

2. Paar R., Marendić A., Jakopcic I., Grgac I. Vibration Monitoring of Civil Engineering Structures Using Contact-Less Vision-Based Low-Cost Prototype. *Sensors*. 2021, vol. 21, no. 23, № 7952. doi: 10.3390/s21237952

3. Sun L., Liu C., Jiang M., Zhang L., Zhang F., Sui Q., Jia L. Fatigue Crack Prediction Method for Aluminum Alloy Based on Fiber Bragg Grating Array. *Chinese J. of Lasers*. 2021, vol. 48, no. 13, № 1306003. doi: 10.3788/CJL202148.1306003

4. Ornoch L., Popielski P., Olszewski A., Kasprzak A. Ultrasonic Sensors Enabling Early Detection of Emergency Trends and Analysis of Structure Inclination and Stability by Means of Highly Accurate Level Measurements. *Sensors*. 2021, vol. 21, no. 5, pp. 1–14. doi: 10.3390/s21051789

5. Sivagami A., Jayakumar S., Kandavalli M. A. Structural Health Monitoring Using Smart Sensors. *AIP Conf. Proc.* 2020, vol. 2281, № 020034. doi: 10.1063/5.0026292

6. Ćmielewski K., Karsznia K., Kuchmister J., Gołuch P., Wilczyńska I. Accuracy and Functional Assessment of an Original Low-Cost Fibre-Based Inclinator Designed for Structural Monitoring. *Open Geosciences*. 2020, vol. 12, no. 1, pp. 1052–1059. doi: 10.1515/geo-2020-0171

7. Shekhovtsov G. A., Shekhovtsova R. P. *Sovremennye geodezicheskie metody opredeleniya deformatsii inzhenernykh sooruzhenii* [Modern Geodetic Methods for Determining Deformations of Engineering Structures].

N. Novgorod, NNGASU, 2009, 156 p. (In Russ.)

8. Buzykanov S. Tilt Sensor Based on a Solid-State Accelerator. *Sovremennaya elektronika. Skhemnye resheniya*. 2004, pp. 42–45. (In Russ.)

9. Davydov S. Yu., Moshnikov V. A., Fedotov A. A. Gas Adsorption on Semiconductor Oxides: Change in Work Function. *Technical Physics Lett.* 2004, vol. 30, no. 17, pp. 39–44. (In Russ.)

10. Lashkova N. A., Permyakov N. V., Maksimov A. I., Spivak Yu. M., Moshnikov V. A. Local Analysis of Areas of Semiconductor Nanoobjects by the Method of Tunneling Atomic Force Microscopy. *St. Petersburg Polytechnic University J. Physics and Mathematics*. 2015, vol. 1, no. 1, pp. 15–23. (In Russ.)

11. Moshnikov V. A., Maksimov A. I. *Nanochastitsy, nanosistemy i ikh primeneniye* [Nanoparticles, Nanosystems and Their Application]. Sensorics, Energetics, Diagnostics. SPb, Publishing house SPbGETU "LETI", 2020, 280 p. (In Russ.)

12. Nalimova S. S., Myakin S. V., Moshnikov V. A. Controlling Surface Functional Composition and Improving the Gas-Sensing Properties of Metal Oxide Sensors by Electron Beam Processing. *Glass Physics and Chemistry*. 2016, vol. 42, no. 6, pp. 773–780.

13. Pshchelko N. S., Sevryugina M. P. Modeling of Physical and Chemical Processes of Anodic Bonding Technology. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 1040, pp. 513–518. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.513

14. Pshchelko N. S., Tsareva O. S. *Ustroistvo dlya opredeleniya napravleniya mal'kh otklonenii* [Device for Determining the Direction of Small Deviations] Patent RF, no. 201631, 2020 (In Russ.)

15. Pshchelko N. S., Tsareva O. S. Physical Foundations of Using an Electric Field to Improve the Accuracy of Determining the Direction of Small Angles of Deviations. Applied Physics. 2021, no. 3. pp. 60–65. doi: 10.51368/1996-0948-2021-3-60-65 (In Russ.)

Information about the authors

Nikolay S. Pshchelko, Dr Sci. (Eng.) (2011), Associate Professor (1997), Professor of the Department of Physics of the Military Telecommunications Academy named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: electrophysical processes in materials and structures.

Address: Military Telecommunications Academy, 3, Tikhoretsky Ave., St Petersburg 194064, Russia.

E-mail: nikolsp@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5545-0461>

Olga S. Tsareva, Cand. Sci. (Eng.) (2020), Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Civil Engineering Institute of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: deformations; objects of cultural heritage; tilt measuring instruments.

Address: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Polytechnicheskaya St., St Petersburg 195220, Russia

E-mail: tsareva_os@spbstu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1009-1052>

Правила для авторов статей

В редакцию журнала "Известия вузов России. Радиоэлектроника" необходимо представить:

- распечатку рукописи (1 экз.) – твердую копию файла статьи, подписанную всеми авторами (объем оригинальной статьи не менее 8 страниц, обзорной статьи не более 20 страниц);
- электронную копию статьи;
- отдельный файл для каждого рисунка и каждой таблицы в формате тех редакторов, в которых они были подготовлены. Размещение рисунка в электронной копии статьи не освобождает от его представления отдельным файлом;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (1 экз.);
- сведения об авторах и их электронную копию (на русском и английском языках) (1 экз.);
- рекомендацию кафедры (подразделения) к опубликованию (следует указать предполагаемую рубрику) (1 экз.);
- сопроводительное письмо (1 экз.).

Принимаются к публикации статьи на русском и английском языках.

Рукопись не может быть опубликована, если она не соответствует предъявляемым требованиям и материалам, представляемым с ней.

Структура научной статьи

Авторам рекомендуется придерживаться следующей структуры статьи:

- Заголовочная часть:
 - УДК (выравнивание по левому краю);
 - название статьи;
 - авторы (перечень авторов – Ф. И. О. автора (-ов) полностью. Инициалы ставятся перед фамилиями, после каждого инициала точка и пробел; инициалы не отрываются от фамилии. Если авторов несколько – Ф. И. О. разделяются запятыми), если авторов больше 3, необходимо в конце статьи указать вклад каждого в написание статьи;
 - место работы каждого автора и почтовый адрес организации. Если авторы относятся к разным организациям, то после указания всех авторов, относящихся к одной организации, дается ее наименование, а затем список авторов, относящихся ко второй организации, наименование второй организации, и т. д.;
 - аннотация – 200–250 слов, характеризующих содержание статьи;
 - ключевые слова – 5–7 слов и/или словосочетаний, отражающих содержание статьи, разделенных запятыми; в конце списка точка не ставится;
 - источник финансирования – указываются источники финансирования (гранты, совместные проекты и т. п.). Не следует использовать сокращенные названия институтов и спонсирующих организаций;
 - благодарности. В данном разделе выражается признательность коллегам, которые оказывали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес статьи. Прежде чем выразить благодарность, необходимо заручиться согласием тех, кого планируете поблагодарить;
 - конфликт интересов – авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи. Например, «Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов». Если конфликт интересов возможен, то необходимо пояснение (см. <https://publicationethics.org>).
- Заголовочная часть на английском языке:
 - название (Title);

- авторы (Authors);
 - место работы каждого автора (Affiliation). Необходимо убедиться в корректном (согласно уставу организации) написании ее названия на английском языке. Перевод названия возможен лишь при отсутствии англоязычного названия в уставе. Если авторы относятся к разным организациям, то после указания всех авторов, относящихся к одной организации, дается ее наименование, затем приводится список авторов, относящихся ко второй организации, наименование второй организации, и т. д.;
 - аннотация (Abstract);
 - ключевые слова (Keywords);
 - источник финансирования (Acknowledgements);
 - конфликт интересов (Conflict of interest).
- Текст статьи.
 - Приложения (при наличии).
 - Авторский вклад. Если авторов больше 3, необходимо указать вклад каждого в написание статьи.
 - Список литературы (библиографический список);
 - Информация об авторах.

Название статьи должно быть информативным, с использованием основных терминов, характеризующих тему статьи, и четко отражать ее содержание в нескольких словах. Хорошо сформулированное название – гарантия того, что работа привлечет читательский интерес. Следует помнить, что название работы прочтут гораздо больше людей, чем ее основную часть.

Авторство и место в перечне авторов определяется договоренностью последних. При примерно равном авторском вкладе рекомендуется алфавитный порядок.

Аннотация представляет собой краткое описание содержания изложенного текста. Она должна отражать актуальность, постановку задачи, пути ее решения, фактически полученные результаты и выводы. Содержание аннотации рекомендуется представить в структурированной форме:

Введение. Приводится общее описание исследуемой области, явления. Аннотацию не следует начинать словами «Статья посвящена...», «Цель настоящей статьи...», так как вначале надо показать необходимость данного исследования в силу пробела в научном знании, почему и зачем проведено исследование (описать кратко).

Цель работы. Постановка цели исследования (цель может быть заменена гипотезой или исследовательскими вопросами).

Материалы и методы. Обозначение используемой методологии, методов, процедуры, где, как, когда проведено исследование и пр.

Результаты. Основные результаты (приводятся кратко с упором на самые значимые и привлекательные для читателя/научного сообщества).

Обсуждение (Заключение). Сопоставление с другими исследованиями, описание вклада исследования в науку.

В аннотации не следует упоминать источники, использованные в работе, пересказывать содержание отдельных разделов.

При написании аннотации необходимо соблюдать особый стиль изложения: избегать длинных и сложных предложений, выражать мысли максимально кратко и четко. Составлять предложения только в настоящем времени и только от третьего лица.

Рекомендуемый объем аннотации – 200–250 слов.

Ключевые слова – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования. Рекомендуемое количество ключевых слов/фраз – 5–7, количество слов внутри ключевой фразы – не более 3.

Текст статьи излагается в определенной последовательности. Рекомендуется придерживаться формата IMRAD (Introduction, Methods, Results, Discussion; Введение, Методы, Результаты, Обсуждение):

Введение. Во введении автор знакомит с предметом, задачами и состоянием исследований по теме публикации; при этом необходимо обязательно ссылаться на источники, из которых берется информация. Автор приводит описание "белых пятен" в проблеме или того, что еще не сделано, и формулирует цели и задачи исследования.

В тексте могут быть применены сноски, которые нумеруются арабскими цифрами. В сносках могут быть размещены: ссылки на анонимные источники из Интернета, ссылки на учебники, учебные пособия, ГОСТы, авторефераты, диссертации (если нет возможности процитировать статьи, опубликованные по результатам диссертационного исследования).

Методы. Необходимо описать теоретические или экспериментальные методы исследования, используемое оборудование и т. д., чтобы можно было оценить и/или воспроизвести исследование. Метод или методологию проведения исследования целесообразно описывать в том случае, если они отличаются новизной.

Научная статья должна отображать не только выбранный инструментарий и полученные результаты, но и логику самого исследования или последовательность рассуждений, в результате которых получены теоретические выводы. По результатам экспериментальных исследований целесообразно описать стадии и этапы экспериментов.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. В описании полученных результатов не должно быть никаких пояснений – они даются в разделе «Обсуждение».

Обсуждение (Заключение и Выводы). В этой части статьи авторы интерпретируют полученные результаты в соответствии с поставленными задачами исследования, приводят сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Необходимо показать, что статья решает научную проблему или служит приращению нового знания. Можно объяснять полученные результаты на основе своего опыта и базовых знаний, приводя несколько возможных объяснений. Здесь излагаются предложения по направлению будущих исследований.

Список литературы (библиографический список) содержит сведения о цитируемом, рассматриваемом или упоминаемом в тексте статьи литературном источнике. В список литературы включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов и монографии).

Список литературы должен иметь не менее 15 источников (из них, при наличии, не более 20 % – на собственные работы), имеющих статус научных публикаций.

Приветствуются ссылки на современные англоязычные издания (требования МНБД Scopus – 80 % цитируемых англоязычных источников).

Ссылки на неопубликованные и нетиражированные работы не допускаются. Не допускаются ссылки на учебники, учебные пособия, справочники, словари, диссертации и другие малотиражные издания.

Если описываемая публикация имеет цифровой идентификатор Digital Object Identifier (DOI), его необходимо указывать в самом конце библиографической ссылки в формате "doi: ...". Проверять наличие DOI статьи следует на сайте: <http://search.crossref.org> или <https://www.citethisforme.com>.

Нежелательны ссылки на источники более 10–15-летней давности, приветствуются ссылки на современные источники, имеющие идентификатор doi.

За достоверность и правильность оформления представляемых библиографических данных авторы несут ответственность вплоть до отказа в праве на публикацию.

Аннотация на английском языке (Abstract) в русскоязычном издании и международных базах данных является для иностранных читателей основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и изложенных в ней результатах исследований. Зарубежные специалисты по аннотации оценивают публикацию, определяют свой интерес к работе российского ученого, могут использовать ее в своей публикации и сделать на нее ссылку, открыть дискуссию с автором.

Текст аннотации должен быть связным и информативным. При написании аннотации рекомендуется использовать Present Simple Tense. Present Perfect Tense является допустимым. Рекомендуемый объем – 200–250 слов.

Список литературы (References) для зарубежных баз данных приводится полностью отдельным блоком, повторяя список литературы к русскоязычной части. Если в списке литературы есть ссылки на иностранные публикации, то они полностью повторяются в списке, готовящемся в романском алфавите. В References совершенно недопустимо использовать российский ГОСТ 7.0.5–2008. Библиографический список представляется с переводом русскоязычных источников на латиницу. При этом применяется транслитерация по системе BSI (см. <http://ru.translit.net/?account=bsi>).

Типовые примеры описания в References приведены на сайте журнала <https://re.eltech.ru>.

Сведения об авторах

Включают для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание (с датами присвоения и присуждения), почетные звания (с датами присвоения и присуждения), краткую научную биографию, количество печатных работ и сферу научных интересов (не более 5–6 строк), название организации, должность, служебный и домашний адреса, служебный и домашний телефоны, адрес электронной почты. Если ученых и/или академических степеней и званий нет, то следует указать место получения высшего образования, год окончания вуза и специальность. Также требуется включать идентификационный номер исследователя ORCID (Open Researcher and Contributor ID), который отображается как адрес вида <http://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>. При этом важно, чтобы кабинет автора в ORCID был заполнен информацией об авторе, имел необходимые сведения о его образовании, карьере, другие статьи. Вариант «нет общедоступной информации» при обращении к ORCID не допускается. В сведениях следует указать автора, ответственного за прохождение статьи в редакции.

Правила оформления текста

Текст статьи подготавливается в текстовом редакторе Microsoft Word. Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля – верхнее, левое и нижнее 2.5 см, правое 2 см; колонтитулы – верхний 2 см, нижний 2 см. Применение полужирного и курсивного шрифтов допустимо при крайней необходимости.

Дополнительный, поясняющий текст следует выносить в подстрочные ссылки при помощи знака сноски, а при большом объеме – оформлять в виде приложения к статье. Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) – в квадратных прямых.

Все сведения и текст статьи набираются гарнитурой "Times New Roman"; размер шрифта 10.5 pt; выравнивание по ширине; абзацный отступ 0.6 см; межстрочный интервал "Множитель 1.1"; автоматическая расстановка переносов.

Правила верстки списка литературы, формул, рисунков и таблиц подробно описаны на сайте <https://re.eltech.ru>.

Перечень основных тематических направлений журнала

Тематика журнала соответствует группам специальностей научных работников:

- 05.12.00 – "Радиотехника и связь" (05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения, 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии, 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций, 05.12.14 Радиолокация и радионавигация);
- 05.27.00 – "Электроника" (05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника на квантовых эффектах, 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника, 05.27.03 – Квантовая электроника, 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники);
- 05.11.00 – "Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы" в редакции приказа ВАК от 10.01.2012 № 5 (05.11.01 – Приборы и методы измерения по видам измерений, 05.11.03 – Приборы навигации, 05.11.06 – Акустические приборы и системы, 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы, 05.11.08 – Радиоизмерительные приборы, 05.11.10 – Приборы и методы для измерения ионизирующих излучений и рентгеновские приборы, 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, 05.11.14 – Технология приборостроения, 05.11.15 – Метрология и метрологическое обеспечение, 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям), 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения, 05.11.18 – Приборы и методы преобразования изображений и звука).

Указанные специальности представляются в журнале следующими основными рубриками:

"Радиотехника и связь":

- Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов.
- Проектирование и технология радиоэлектронных средств.
- Телевидение и обработка изображений.
- Электродинамика, микроволновая техника, антенны.
- Системы, сети и устройства телекоммуникаций.
- Радиолокация и радионавигация.

"Электроника":

- Микро- и наноэлектроника.
- Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника.
- Радиофотоника.
- Электроника СВЧ.

"Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы":

- Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн.
- Метрология и информационно-измерительные приборы и системы.
- Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий.

Адрес редакционной коллегии: 197022, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5 литера Ф, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", редакция журнала "Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника"

Технические вопросы можно выяснить по адресу radioelectronic@yandex.ru

Уважаемые авторы!

Обратите внимание, что на основании рекомендации Высшей аттестационной комиссии (ВАК) приказом Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118 утверждена новая номенклатура научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени.

Защиты диссертаций по старой номенклатуре научных специальностей (приказ Министерства образования и науки Российской Федерации от 23 октября 2017 г. № 1027 с последующими изменениями) будут идти до 16 октября 2022 г.

На основании рекомендации президиума ВАК от 21 мая 2021 г. № 13/19 журнал будет публиковать статьи по старой номенклатуре научных специальностей до 4-го номера включительно (выход номера в сентябре 2022 г.)

Соответственно прием статей по данной номенклатуре будет осуществляться до 1 июля 2022 г. Прием журналом статей по новой номенклатуре научных специальностей – с 01 января 2022 г.

С 01.01.2022 г. по 01.07.2022 г. журналом принимаются статьи по старой и новой номенклатурам научных специальностей, с 01.07.2022 г. – только по новой номенклатуре научных специальностей

Перечень основных тематических направлений журнала

Тематика журнала соответствует группам специальностей научных работников.

Старая номенклатура научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени (действует до 16.10.2022 г.):

- 05.12.00 – "Радиотехника и связь" (05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения, 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии, 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций, 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация);
- 05.27.00 – "Электроника" (05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника на квантовых эффектах, 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника, 05.27.03 – Квантовая электроника, 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники);
- 05.11.00 – "Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы" (05.11.01 – Приборы и методы измерения по видам измерений, 05.11.03 – Приборы навигации, 05.11.06 – Акустические приборы и системы, 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы, 05.11.08 – Радиоизмерительные приборы, 05.11.10 – Приборы и методы для измерения ионизирующих излучений и рентгеновские приборы, 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, 05.11.14 – Технология приборостроения, 05.11.15 – Метрология и метрологическое обеспечение, 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям), 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения, 05.11.18 – Приборы и методы преобразования изображений и звука).

Новая номенклатура научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени:

2.2 – Электроника, фотоника, приборостроение и связь:

- 2.2.1 – Вакуумная и плазменная электроника.
- 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.
- 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.
- 2.2.4 – Приборы и методы измерения (по видам измерений).
- 2.2.5 – Приборы навигации.
- 2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.
- 2.2.7 – Фотоника.
- 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.
- 2.2.9 – Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры.
- 2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение.
- 2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы.
- 2.2.12 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения.
- 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.
- 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.
- 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.
- 2.2.16 – Радиолокация и радионавигация.

Указанные специальности представляются в журнале следующими основными рубриками:

- Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов.
- Проектирование и технология радиоэлектронных средств.
- Телевидение и обработка изображений.
- Электродинамика, микроволновая техника, антенны.
- Системы, сети и устройства телекоммуникаций.
- Радиолокация и радионавигация.

- Микро- и нанoeлектроника.
- Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника.
- Радиофотоника.
- Электроника СВЧ.

- Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн.
- Метрология и информационно-измерительные приборы и системы.
- Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий.

Известия высших учебных заведений России. **РАДИОЭЛЕКТРОНИКА**
Journal of the Russian Universities. **RADIOELECTRONICS**

Том 25 № 1 2022

Vol. 25 No. 1 2022

Научный редактор А. М. Мончак
Редакторы Э. К. Долгатов, И. Г. Скачек
Компьютерная верстка М. И. Поповой,
Е. И. Третьяковой

Science Editor A. M. Monchak
Editors E. K. Dolgatov, I. G. Skachek
DTP Professional M. I. Popova
E. I. Tretyakova

Подписано в печать 25.02.22. Формат 60×84 1/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Уч.-изд. л. 10.66. Печ. л. 10.25. Тираж 300 экз. (1-й завод 1–150 экз.) Заказ 10.
Цена свободная.

Signed to print 25.02.22. Sheet size 60×84 1/8.
Educational-ed. liter. 10.66. Printed sheets 10.25. Number of copies 300.
Printing plant 1–150 copies. Order no. 10.
Free price.

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197022, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5 Ф

ETU Publishing house
5F Prof. Popov St., St Petersburg 197022, Russia