



DOI: 10.32603/1993-8985

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

Известия высших учебных заведений России

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Том 24 № 3 2021



Journal of the Russian Universities

RADIOELECTRONICS

Vol. 24 No. 3 2021

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

2021

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 «Пресса России» 45818

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:

197376, Санкт-Петербург,

ул. Проф. Попова, д. 5, 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, DSc, 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 "Press of Russia" catalogue is 45818
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, 5 Prof. Popov St., St Petersburg 197376, 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, DSc, 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

Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов

Потапов А. А., Кузнецов В. А., Аликулов Е. А. Анализ способов комплексирования изображений, формируемых многодиапазонными радиолокационными станциями с синтезированной апертурой.....6

Буренева О. И., Горбунов И. Г., Комаров Г. В., Коновалов А. А., Куприянов М. С., Шичкина Ю. А. Макет автомобильного радара диапазона 77 ГГц.....22

Проектирование и технология радиоэлектронных средств

Кузин А. А., Мякинников А. В., Шабалин С. А. Особенности конструкции антенных решеток автомобильных радаров, построенных на основе передающих и приемных многоэлементных модулей.....39

Телевидение и обработка изображений

Зубов И. Г., Обухова Н. А. Метод автоматического определения трехмерной траектории транспортных средств на изображении.....49

Радиолокация и радионавигация

Кутузов В. М., Овчинников М. А., Виноградов Е. А. Характеристики точности параметрического метода Берга при пространственной обработке сигналов в линейной неэквидистантной антенной решетке.....60

Гусев С. Н., Журавлев С. В., Попов А. В. Определение пространственной разрешающей способности на радиолокационных изображениях при дистанционном зондировании Земли.....72

Микро- и нанoeлектроника

Смердов Р. С., Спивак Ю. М., Мошников В. А., Мустафаев А. С. Магнитные и плазмонные композиционные наноструктуры для реализации оптических фильтров в системах контроля и диагностики веществ и материалов.....81

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

Севрюкова Е. А., Волкова Е. А., Дорошенко В. А., Солодков А. В. Разработка макета распределенной сенсорной системы экологического мониторинга.....98

От редакции

Знаменательные даты.....109

Правила для авторов статей111

CONTENTS

Original articles

Radio-Engineering Means of Transmission, Reception and Processing of Signals

Potapov A. A., Kuznetsov V. A., Alikulov E. A. Methods for Complexing Images Formed by Multi-Band Synthetic Aperture Radars.....6

Bureneva O. I., Gorbunov I. G., Komarov G. V., Konovalov A. A., Kupriyanov M. S., Shichkina Yu. A. A Prototype of Automotive 77 GHz Radar.....22

Engineering Design and Technologies of Radio Electronic Facilities

Kuzin A. A., Miakinkov A. V., Shabalin S. A. Design Features of Antenna Arrays of Automotive Radars Based on Transmitting and Receiving Multi-Element Modules.....39

Television and Image Processing

Zubov I. G., Obukhova N. A. Method for Automatic Determination of a 3D Trajectory of Vehicles in a Video Image.....49

Radar and Navigation

Kutuzov V. M., Ovchinnikov M. A., Vinogradov E. A. Accuracy Characteristics of the Parametric Burg Method for Spatial Signal Processing in a Nonuniform Array Antenna.....60

Gusev S. N., Zhuravlev S. V., Popov A. V. Determination of the Spatial Resolution of Radar Images in Remote Sensing of the Earth.....72

Micro- and Nanoelectronics

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.....81

Medical Devices and Devices for Control of the Environment, Substances, Materials and Products

Sevryukova E. A., Volkova E. A., Doroshenko V. A., Solodkov A. V. A Prototype Unit of a Distributed Sensor System for Ecological Monitoring.....98

From the Editor

Significant Dates.....109

Author's Guide.....111

Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов

УДК 004.932

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-6-21>

Анализ способов комплексирования изображений, формируемых многодиапазонными радиолокационными станциями с синтезированной апертурой

А. А. Потапов¹✉, В. А. Кузнецов², Е. А. Аликулов²

¹ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

² ВУНЦ ВВС "Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", Воронеж, Россия

✉ potapov@cplire.ru

Аннотация

Введение. Особое место среди систем дистанционного зондирования Земли космического и авиационного базирования занимают радиолокационные станции с синтезированной апертурой. Современный уровень развития таких систем обуславливает возможность проведения радиолокационной съемки одновременно в нескольких частотных диапазонах, при этом возникает необходимость комплексирования изображений, сформированных в каждом из частотных каналов. Задача такого класса до сих пор не решена в полном объеме вследствие специфических особенностей радиолокационных изображений.

Цель работы. Обзор принципов формирования и анализ способов совместной обработки изображений, полученных с помощью многодиапазонных радиолокационных станций с синтезированием апертуры космического и воздушного базирования.

Методы. Для достижения поставленной цели используется методология системного анализа, составными этапами которого являются декомпозиция, анализ и синтез. Так, декомпозиция задачи комплексирования многодиапазонных радиолокационных изображений выполнена по критерию влияния различных факторов на характеристики радиолокационных изображений в разных частотных диапазонах. К таким факторам относят: принципы формирования радиолокационных изображений, особенности радиолокационных изображений многодиапазонных радиолокационных станций с синтезированной апертурой с реальными характеристиками и уровни комплексирования.

Результаты. Результату обзора и анализа выявленных факторов, согласно классическому системному подходу, сопутствуют соответствующие выводы по недостаткам каждого элемента декомпозиции и синтез предложения по достижению цели. Показано, что совместная обработка многодиапазонных радиолокационных изображений может проводиться на уровнях сигналов, пикселей, признаков и решений, а также их совокупностей. Каждый из рассмотренных подходов характеризуется своими недостатками, не позволяющими реализовать в полной мере комплексирование многодиапазонных радиолокационных изображений без потерь информации, что обусловлено отсутствием информационной избыточности радиолокационных изображений в отличие, например, от оптических.

Заключение. Результатом работы являются предложения по реализации способа и синтезу системы комплексирования радиолокационных изображений на основе текстурно-фрактального подхода. Предложены направления дальнейшей работы в данной предметной области по удовлетворению всех требований к полноте, достоверности и информативности дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: системный анализ, радиолокатор с синтезированной апертурой, многодиапазонное радиолокационное изображение, комплексирование, фрактальная парадигма

Для цитирования: Потапов А. А., Кузнецов В. А., Аликулов Е. А. Анализ способов комплексирования изображений, формируемых многодиапазонными радиолокационными станциями с синтезированной апертурой // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 3. С. 6–21. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-6-21

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Статья поступила в редакцию 30.04.2021; принята к публикации после рецензирования 24.05.2021; опубликована онлайн 29.06.2021

© Потапов А. А., Кузнецов В. А., Аликулов Е. А., 2021



Methods for Complexing Images Formed by Multi-Band Synthetic Aperture Radars

Alexander A. Potapov¹✉, Viktor A. Kuznetsov², Elbek A. Alikulov²

¹ V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Moscow, Russia

² MERC AF "Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin",
Voronezh, Russia

✉ potapov@cplire.ru

Abstract

Introduction. Synthetic aperture radars (SAR) are important components of aviation-based systems for remote sensing of the Earth. The current level of such systems allows simultaneous radar surveys in several frequency ranges. Such surveys require complexing of the images formed in each of the frequency channels, which task is yet to be resolved.

Aim. To review the formation principles and methods for joint processing of images using space and aviation-based multi-band synthetic aperture radar systems.

Materials and methods. The methodology of systems analysis, involving the integral stages of decomposition, analysis and synthesis, was used. Decomposition of integrating multi-band radar images was performed considering the effect of various factors on the characteristics of radar images in different frequency ranges. Such factors include the principles of radar imaging, issues of radar images of multi-band synthetic aperture radars with real characteristics, and complexing levels.

Results. According to the classical systems approach, the results of review and analysis are corresponded by appropriate conclusions on the shortcomings of each decomposition element and the synthesis of a proposal for achieving the goal. It was shown that joint processing of multi-band radar images can be carried out at the levels of signals, pixels, features and solutions, as well as their aggregates. Each approach is characterised by its shortcomings, which impede implementation of full integration of multi-band radar images without loss of information, which is due to the absence of information redundancy of radar images, compared to, e.g., optical images.

Conclusion. Recommendations on the application of a particular method and the synthesis of a system for radar complexing images based on the texture-fractal approach were formulated. Directions for further work meeting all the requirements for completeness, reliability and information content of remote sensing of the Earth were outlined.

Keywords: systems analysis, synthetic aperture radar, multi-band radar image, complexing, fractal paradigm

For citation: Potapov A. A., Kuznetsov V. A., Alikulov E. A. Methods for Complexing Images Formed by Multi-Band Synthetic Aperture Radars. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 3, pp. 6–21. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-6-21

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

Submitted 30.04.2021; accepted 24.05.2021; published online 29.06.2021

Введение. В современных условиях развития радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) традиционным и в то же время актуальным направлением их совершенствования является улучшение технических характеристик. Особенно важную роль при этом играют противоречивые требования по обеспечению высокой информативности, достоверности и оперативности при любых условиях съемки и значительном объеме данных, а также по увеличению

числа одновременно решаемых задач в различных режимах работы. Разрешение данных несоответствий возможно при переходе к многоканальным (многочастотным или многодиапазонным) радиолокационным системам и комплексированию формируемых с их помощью данных.

Особое место среди систем ДЗЗ авиационного и космического базирования занимают радиолокационные станции с синтезированной апертурой антенны (РСА), позволяющие осуществлять съемку

**Анализ способов комплексирования изображений, формируемых
многодиапазонными радиолокационными станциями с синтезированной апертурой**
Methods for Complexing Images Formed by Multi-Band Synthetic Aperture Radars

земной поверхности при любых условиях и на больших дальностях. Высокая разрешающая способность РСА достигается путем накопления сигнала на интервале синтеза апертуры антенны. На сегодняшний день существуют области применения РСА, не имеющие аналогов в оптическом диапазоне частот электромагнитных волн (ЭМВ), – обнаружение малозаметных, малоконтрастных и скрытых лесной растительностью объектов, подповерхностная радиолокация и ледовая разведка. Синхронное использование нескольких зондирующих сигналов на разных рабочих частотах позволило существенно расширить сферу применения РСА. Помимо значительного повышения надежности и помехозащищенности многодиапазонные (МД) РСА обладают высокой информативностью получаемых данных за счет особенностей отражения от объектов радиоволн с различными длинами волн. При этом одной из главных если не научных проблем, то научно-технических задач ДЗЗ является комплексирование радиолокационных изображений (РЛИ), сформированных МД РСА космического и воздушного базирования.

Цель работы – обзор принципов формирования и анализ способов совместной обработки изображений, полученных с помощью многодиапазонных радиолокационных станций с синтезированием апертуры космического и воздушного базирования.

Методика системного анализа задачи комплексирования МД РЛИ. Для достижения поставленной цели использована методология системного анализа, основными этапами которого являются декомпозиция, анализ и синтез. Так, декомпозиция задачи комплексирования МД РЛИ выполнена по критерию влияния различных факторов на характеристики РЛИ в разных частотных диапазонах. К таким факторам относят принципы формирования РЛИ, особенности формирования РЛИ в МД РСА с реальными характеристиками и уровни комплексирования. Результату их анализа, согласно классическому системному подходу, сопутствуют соответствующие выводы по недостаткам каждого элемента декомпозиции и синтез предложений по достижению целевой функции – повышения эффективности дистанционного зондирования Земли.

Принципы формирования сигналов и РЛИ в МД РСА. Многочастотный зондирующий сигнал многодиапазонной РСА представляет собой совокупность нескольких сигналов с различными

значениями несущей частоты и ширины спектра, одинаковыми или разными законами модуляции. Принципиально возможно формирование многочастотного сигнала излучением нескольких сигналов с различными несущими частотами одновременно (синхронно), с временным разделением (со смещением во времени и межпериодной обработкой) за счет быстрой перестройки несущей частоты зондирующего сигнала или с пространственно-временным разделением в случае многопролетной съемки.

Одновременное (синхронное) излучение сигналов с различными несущими частотами может быть осуществлено несколькими способами [1]. Наиболее простым из них является способ, при котором многочастотный сигнал формируется набором передатчиков с различными несущими частотами. В таких МД РСА, как правило, каждый передатчик сопряжен с отдельной передающей антенной, а каждый приемник подключен к отдельной приемной антенне. Такая схема передающего тракта характерна для МД РСА непрерывного (НИ) или квазинепрерывного (КНИ) излучения. Одновременное излучение сигналов с различными несущими частотами может быть реализовано в передающем устройстве в качестве задающего генератора многочастотного автогенератора. Одним из современных и широко используемых способов одновременного формирования сигналов с различными несущими частотами является синтезирование частот.

Реализация любого из перечисленных способов одновременного формирования многочастотного сигнала сопряжена с рядом особенностей, связанных с усложнением схемы передающего тракта, исключением взаимного влияния сигналов различных частот, одновременным усилением сигналов в широком диапазоне частот и увеличением массогабаритных характеристик РСА. Следует также иметь в виду, что при наличии в тракте передачи общих элементов для сигналов всех частот одновременное формирование многочастотного сигнала оказывается энергетически невыгодным, поскольку мощность каждого из составляющих сигналов в среднем не может быть больше величины отношения предельно допустимой передаваемой мощности к числу несущих частот.

Существует также способ формирования многочастотного сигнала с пространственно-временным разделением, когда радиолокационная съемка проводится в несколько пролетов по при-

близительно одной траектории, с разными несущими частотами в каждом пролете. Такой подход является самым трудоемким, сложно реализуемым по причине необходимости совмещения всех формируемых в каждом диапазоне ЭМВ изображений, компенсации траекторных нестабильностей в каждом пролете и в рамках данной работы не рассматривается.

Принцип формирования РЛИ за счет синтеза апертуры известен и широко освещен в современной литературе [1–3]. При использовании активной фазированной антенной решетки (АФАР) синтез изображения проводится согласно схеме, приведенной на рис. 1.

Геометрия синхронной радиолокационной съемки в режиме синтеза апертуры в каждом из рассмотренных случаев является классической как для космических, так и для РСА воздуш-

ного базирования, в том числе с помощью комплексов с беспилотными летательными аппаратами. Безусловно, принцип формирования изображений существенно зависит от используемых режимов работы РСА, например полосового или телескопического обзора. В самом общем случае принцип формирования радиолокационных изображений с помощью МД РСА в режиме полосового обзора представлен на рис. 2.

Как видно из рис. 2, одновременная съемка в нескольких $1...n...Q$ частотных диапазонах ЭМВ обусловлена рядом особенностей формирования РЛИ, связанных, в частности, с интервалом накопления (синтеза) зондирующего сигнала $T_{c1}...T_{cQ}$ (рис. 3) и разрешающей способностью РСА $\delta_1... \delta_Q$ (рис. 4), не позволяющих использовать те же способы совместной обработки, что и в случае

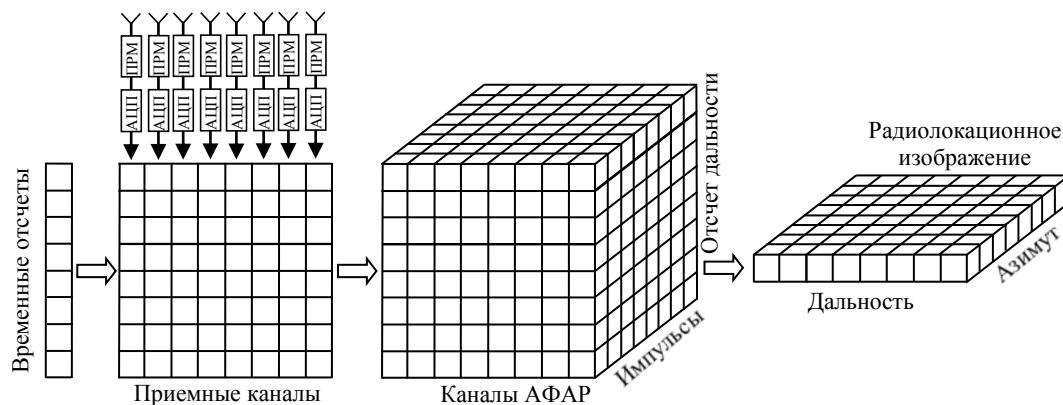


Рис. 1. Принцип формирования радиолокационного изображения РСА

Fig. 1. SAR image forming principle

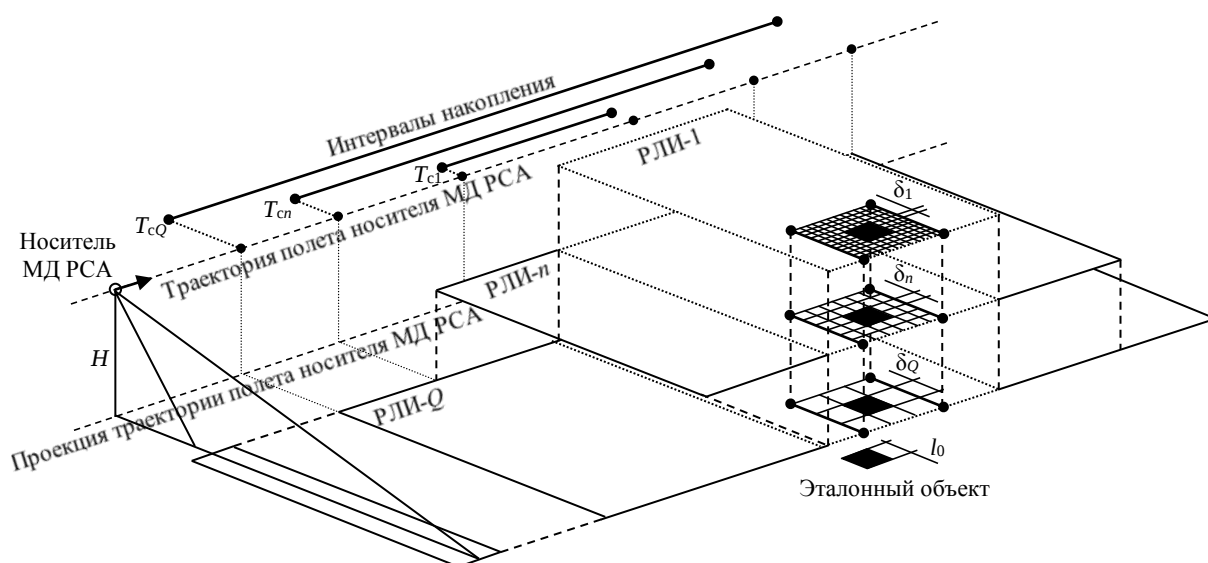


Рис. 2. Геометрия радиолокационной съемки с помощью МД РСА

Fig. 2. Radar sensing geometry with multi-band SAR

оптического диапазона, например при мульти- и гиперспектральной съемке.

Как видно из рис. 3 и 4, при комплексировании таких РЛИ, безусловно, возникают трудности с их совмещением вследствие ряда особенностей их формирования.

Особенности формирования РЛИ в различных диапазонах ЭМВ. Основными характеристиками РЛИ являются: разрешение по дальности

δ_R , по азимуту (путевой дальности) δ_{Az} , динамический диапазон и зона обзора.

Формирование РЛИ с помощью одноканальной РСА НИ проводится известным образом [1–3], при этом потенциальное разрешение по дальности рассчитывается согласно выражению

$$\delta_R = \frac{c}{2\Delta f_c}, \quad (1)$$

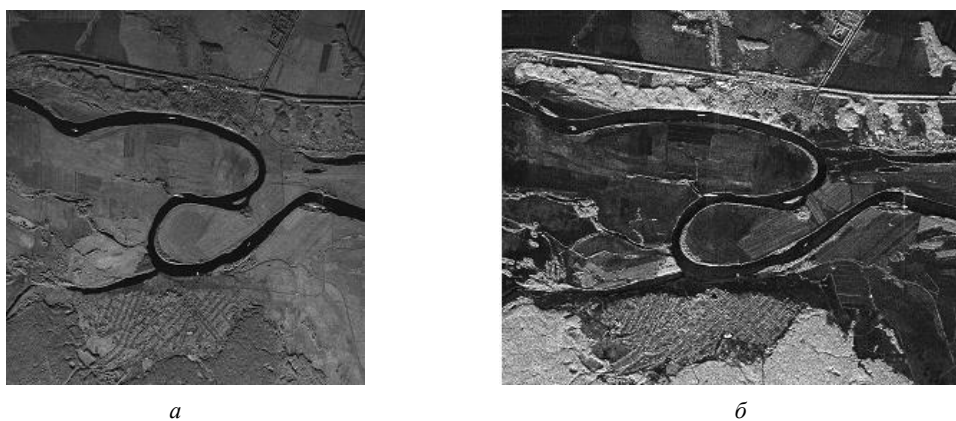


Рис. 3. Пример РЛИ одного участка местности, полученных РСА "Компакт" [4]:
а – в X-диапазоне; б – в L-диапазоне

Fig. 3. An example of a ground radar image formed by SAR "Kompakt" [4]: а – in X- and б – L-band respectively

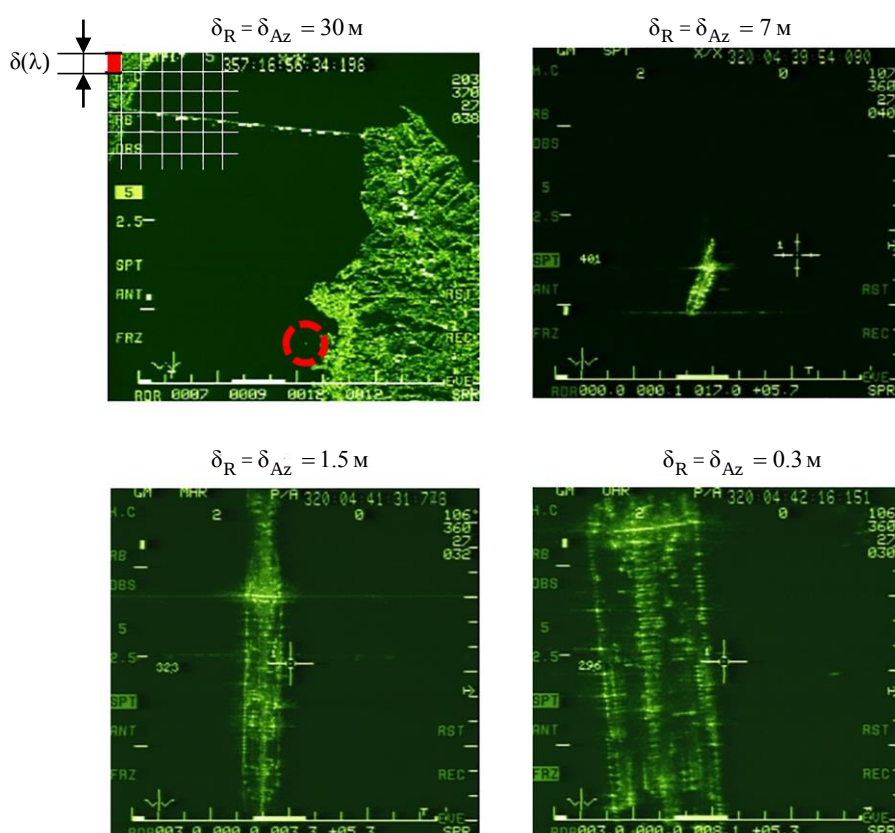


Рис. 4. Пример РЛИ одного объекта (корабля) при разном пространственном разрешении

Fig. 4. An example of object (ship) radar images with different spatial resolution

а по азимуту –

$$\delta_{Az} = \frac{R \lambda}{2v_n T_c \cos \varphi}. \quad (2)$$

Как видно из (1), требуемого разрешения по дальности можно достичь за счет задания ширины спектра. При этом существует тенденция увеличения значения Δf_c и, соответственно, разрешения по дальности с повышением рабочей частоты, обусловленная физическими возможностями и ограничениями в каждом из диапазонов. Поэтому на рис. 4 разрешение РЛИ показано условно как функция от длины волны $\delta = f(\lambda)$. Для эффективного в смысле достоверности дешифрирования РЛИ, а также для удобства интерпретации одним из требований при формировании РЛИ является равенство значений $\delta = \delta_R = \delta_{Az}$. Приравнение (1) и (2) позволяет определить требования к интервалу накопления зондирующего сигнала:

$$T_c = \frac{\Delta f_c R \lambda}{c v_n \cos \varphi}. \quad (3)$$

Как следует из (3), единственным параметром, с помощью которого имеется возможность задавать разрешающую способность одноканальной РСА, является скорость носителя v_n . Для МД РСА, размещаемой на одном носителе, такая возможность, естественно, исключается. Поэтому разработчикам МД РСА приходится искать рациональные значения длины волны λ и/или ширины спектра сигнала Δf_c . Кроме того, поскольку время начала и окончания синтезирования в каждом канале различно, то длина полосы обзора также будет отличаться (см. рис. 3). Ширина полосы обзора также будет различна, однако стремятся обеспечить ее примерно одинаковой за счет ширины диаграммы направленности антенн в угломестной плоскости, а также мощности излучения каждого канала (передатчика) $P_{прд}$ для обеспечения заданной дальности R_{max} обнаружения цели с эффективной площадью рассеяния σ_c при требуемом отношении сигнал-шум $q_{тр}$ и известных параметрах РСА λ , T_m , $G_{прд}$, $G_{прм}$, N_0 , N_n , L :

$$P_{прд} = \frac{R_{max}^4 (4\pi)^3 q_{тр} N_0 L}{T_m N_n G_{прд} G_{прм} \lambda^2 \sigma_c}. \quad (4)$$

Исходя из анализа (4) применительно к нескольким частотным диапазонам, можно утверждать, что динамический диапазон изображений, сформированных на разных частотах, существенно отличается, что существенно усложняет процесс комплексной обработки МД РЛИ. В [5] показано, что существует возможность выравнивания (расширения или нормирования – в зависимости от задач) динамического диапазона изображений, при этом соотношения для выравнивания динамического диапазона РЛИ, например, леса и городской застройки принципиально отличаются. В связи с высокой априорной неопределенностью и смешанностью типов подстилающей поверхности такой подход не позволяет говорить об универсальности предлагаемого решения. Однако в задачах комплексирования МД РЛИ выравнивание динамического диапазона РЛИ все же является необходимым этапом.

Одной из неочевидных, при этом важных особенностей МД РЛИ является отсутствие информационной избыточности, в отличие от оптических изображений. Так, например, в видимом диапазоне ЭМВ объект на изображениях мультиспектральной съемки отображается без существенных искажений формы и текстуры, с одинаковым разрешением. Комплексирование таких изображений не представляет особой сложности вследствие информационной избыточности, а целью совместной их обработки является повышение информативности. На РЛИ каждого из диапазонов отображаются только те элементы конструкции объекта, линейные размеры которых сопоставимы с длиной волны. Очевидно, что информация на каждом РЛИ не будет содержать одной и той же общей информации об объекте. Кроме того, далеко не на всех РЛИ будут адекватно отображаться форма, размеры и текстура объекта, что представляет особую сложность при комплексировании МД РЛИ. Такое отображение приводит к значительной потере информации на всех этапах дешифрирования данных ДЗЗ.

Обзор существующих МД РСА. Современный уровень развития радиоэлектроники и теории радиолокации позволяет реализовать многоканальные (многодиапазонные, поляриметрические) РСА космического и воздушного базирования с интерферометрической обработкой и видеорежимом. К таким системам можно отнести достаточно большой список образцов, часть из которых представлена в таблице.

Пример МД РСА и их характеристики
An example of multi-band SAR and its characteristics

Название	Разработчик	Диапазон, ГГц	Разрешающая способность, м
AIRSAR	Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, США	0,439(P), 1,26(L), 5,3(C)	1
ASAR	NASA / Jet Propulsion Laboratory, США	C, L, P	2.5
DO-SAR	EADS	S, C, X, Ka	< 0.5
E-SAR	DLR, Германия	P, L, C, X	2
EMISAR	DCRS	C, L	2
F-SAR	DLR, Германия	P, L, S, C, X	0.3
GeoSAR	EarthData	P, X	1
IMARC	НПО БЕГА-М, Россия	VHF, P, L, X	1.5
Компакт	НИИ ТП, Россия	8,6(X), 1,3(L), 0,43(P), 0,14(VHF)	0.5
LORA	FOI	0.2...0.8 (VHF, UHF)	< 1
MEMPHIS	FGAN	Ka, W	0.2
MicroSAR	Space Dynamics Laboratory, США	1,75(L), 5,4(C)	1
NanoSAR B	ImSAR, США	Ku, X, UHF	< 0.3
NanoSAR C	ImSAR, США	Ku, X, UWB, UHF	< 0.3
NuSAR	Space Dynamics Laboratory, США Brigham Young University, США	1,75(L), 9,75(X)	0.3
OrbiSAR	OrbiSAT	P, X	0.5
Pi-SAR	JAXA	L, X	1.5
RAMSES	ONERA	0.4...0.47(P), 1.2...1.4(L), S, C, 9.31...9.61(X), Ka, Ku, W	0.13
SlimSAR	Brigham Young University, США	X, L, UHF	< 0.3
TopoSAR	Intermap Technologies	X, P	1.5
Twin-Otter SAR	Sandia National Laboratories	VHF, UHF, X, Ku, Ka	0.3

Как видно из таблицы, реальных образцов МД РСА, успешно эксплуатируемых в мире, достаточно много. Однако не все разработчики указывают значения рабочих частот, что представляет некоторую сложность при проведении объемного анализа. Несмотря на это, можно получить приближенную оценку параметров косвенным путем по другим известным характеристикам конкретного образца МД РСА. Основными современными тенденциями развития РСА являются:

- повышение информативности РЛИ за счет расширения спектра зондирующего сигнала (увеличения разрешающей способности), многодиапазонного зондирования и полнополяризметрической обработки;
- создание трехмерных радиолокационных портретов за счет интерферометрической обработки;

– повышение оперативности наблюдения (особенно при решении задач видовой разведки) за счет увеличения орбитальной группировки космических аппаратов, расширения полосы, увеличения времени обзора и совместной обработки данных на борту космического или воздушного носителя.

Принципиальным вопросом, мало освещенным в открытых источниках, остается способ комплексирования РЛИ, сформированных одновременно в нескольких частотных диапазонах с помощью МД РСА. Необходимо отметить, что комплексирование РЛИ, полученных с помощью нескольких носителей РСА с разными рабочими частотами, обуславливает необходимость их ко-регистрации (совмещения), что ведет к появлению различного рода ошибок вследствие пространственной декорреляции [6]. Вопросы такого

характера в данной работе не рассматриваются и выходят за рамки проводимых исследований.

Существующие способы комплексирования РЛИ. Известные способы комплексирования изображений можно условно классифицировать по информационным уровням: сигналов, пикселей, признаков и решений (рис. 5). Следует отметить, что характер принимаемого решения зависит от поставленной задачи: в случае сегментации (классификации) подстилающей поверхности – это номер кластера, в случае обнаружения – координаты объекта, в случае распознавания – класс, тип или состояние объекта. Как следует из рис. 5, при таком многообразии подходов к принятию решений каждый из них обусловлен потерей информации на этапе комплексирования, причем характер потерь и ошибок будет различным, в зависимости от выбранного метода комплексирования и характеристик аппаратных средств. Схема комплексирования сигналов, представленная на рис. 5, а, применительно к РСА может соответствовать способам синтеза спектра зондирующего сигнала за счет применения, например, ступенчатой линейной частотной модуляции [7]. Результаты анализа известных способов комплексирования [8–10], соответствующих уровню пикселей на рис. 5, б, показывают, что потеря информации (в частности, яркостных отметок, соответствующих объектам) возможна при вычислении морфологических проекций изображений на форму наиболее информативного изображения, а также при выборе наиболее информативного изображения по критерию максимума собственной энтропии изображения, поскольку в реальных условиях функционирования РСА дестабилизирующие факторы различной природы обуславливают снижение разрешающей способности и искажения на радиолокационных изображениях, что ведет к существенному повышению энтропии РЛИ и, в конечном итоге, приводит к снижению информативности изображения.

Одним из динамичных трендов современной науки в области слияния изображений выступает развитие математического аппарата вейвлет-преобразования. Такой подход широко и успешно используется сейчас в практических приложениях комплексирования гипер- и мультиспектральных изображений. В качестве примера комплексирования на уровне признаков (рис. 5, в) можно привести совместную обработку РЛИ с помощью

вейвлет-преобразования [11, 12]. Сформированные в нескольких частотных диапазонах РЛИ подвергаются радиометрической калибровке с учетом цифровой карты высот, вейвлет-преобразованию с вычислением соответствующих коэффициентов и ко-регистрации РЛИ с формированием одного изображения. Несмотря на расширенные возможности, такой подход позволяет учесть отличия в разрешающей способности каналов РСА лишь за счет радиометрической калибровки [13], что обусловлено ошибками ко-регистрации.

Комплексирование РЛИ на уровне решений (рис. 5, г) носит в большей степени вероятностный характер, в связи с чем решение принимается с учетом вероятностей пропуска и ложной тревоги. Как видно из рис. 5, такой подход является самым трудоемким из приведенных.

Один из наиболее общих подходов, отражающих логику современного комплексирования с учетом признаков всех уровней, представлен на рис. 6 и подробно описан в [14].

Как показывает практика, такой обобщенный подход имеет весьма существенное ограничение: значительные вычислительные затраты, которые невозможно реализовать в большинстве случаев, например на борту воздушного судна или беспилотного летательного аппарата. Кроме того, на основе представленной схемы невозможно осуществить комплексирование МД РЛИ по указанным вначале причинам.

Текстурно-фрактальный подход к комплексированию МД РЛИ. Новейшие исследования в области обработки изображений показывают перспективность применения методов фрактальной теории [15–18]. Такой подход основан на понятиях самоподобия и дробной меры природных процессов и объектов. При этом изображение рассматривается не как совокупность отдельных элементов с определенными характеристиками [19], а как некоторая структура, обладающая внутренними топологическими связями между элементами и характеризующая объект в целом. Рис. 7 поясняет данную концепцию представления РЛИ в разных диапазонах ЭМВ с точки зрения отражающих элементов, соответствующих длинам волн ЭМВ.

Количественная оценка сложности структуры базируется на таких показателях, как дробная фрактальная размерность, фрактальная сигнатура и др. [20, 21]. На сегодняшний день известные методы фрактального анализа РЛИ основаны

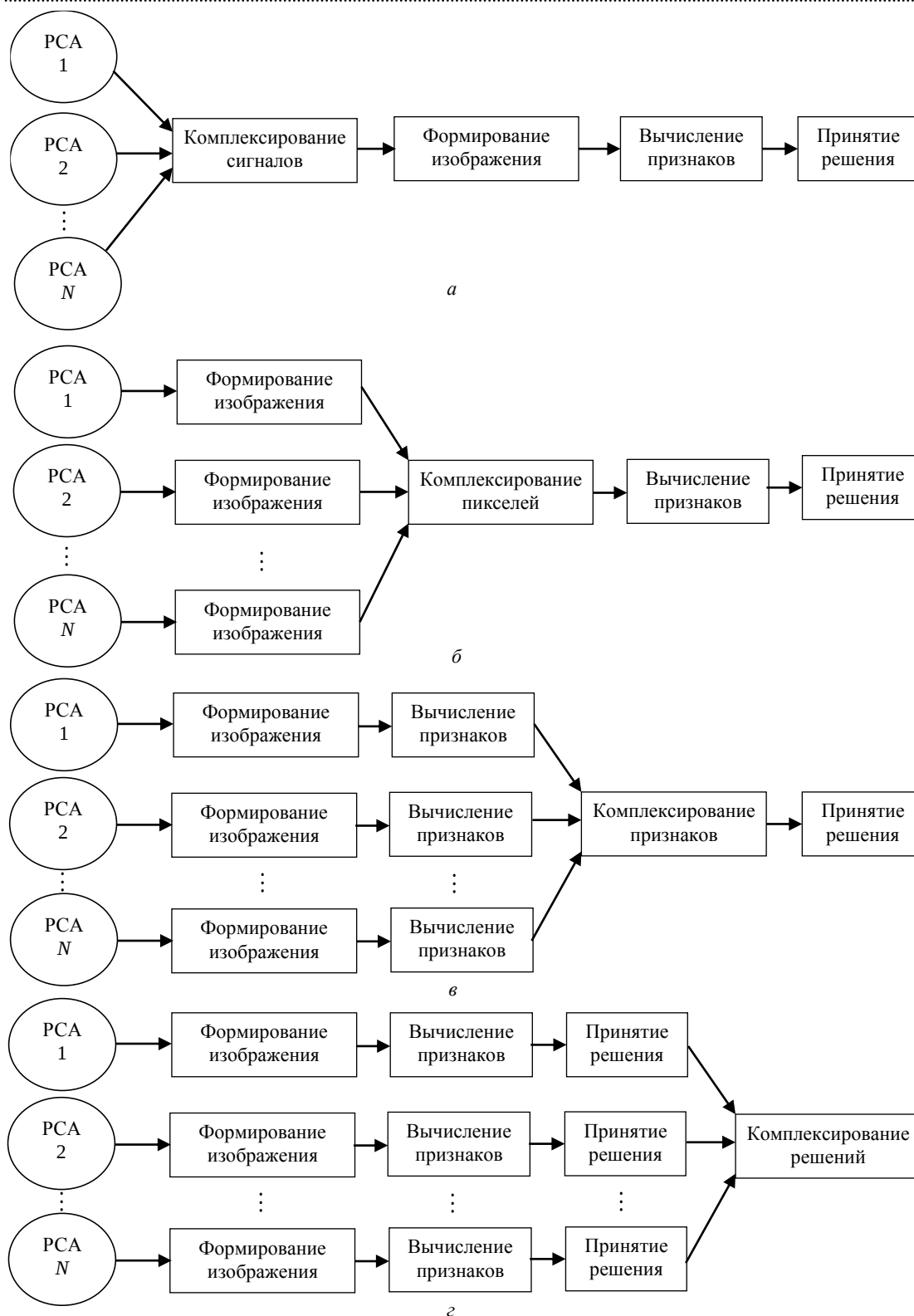


Рис. 5. Комплексирование РЛИ на уровнях: *a* – сигналов; *б* – пикселей; *в* – признаков; *г* – решений

Fig. 5. Radar image fusion on signals (*a*), pixels (*б*), features (*в*) and decisions (*г*) levels

на вычислении отдельных фрактальных признаков. При определении фрактальной размерности проводится масштабирование одного РЛИ, полученного в

одном диапазоне ЭМВ, или генерация дополнительных изображений из исходного. Так, при оценке фрактальной размерности одночастотного РЛИ мето-

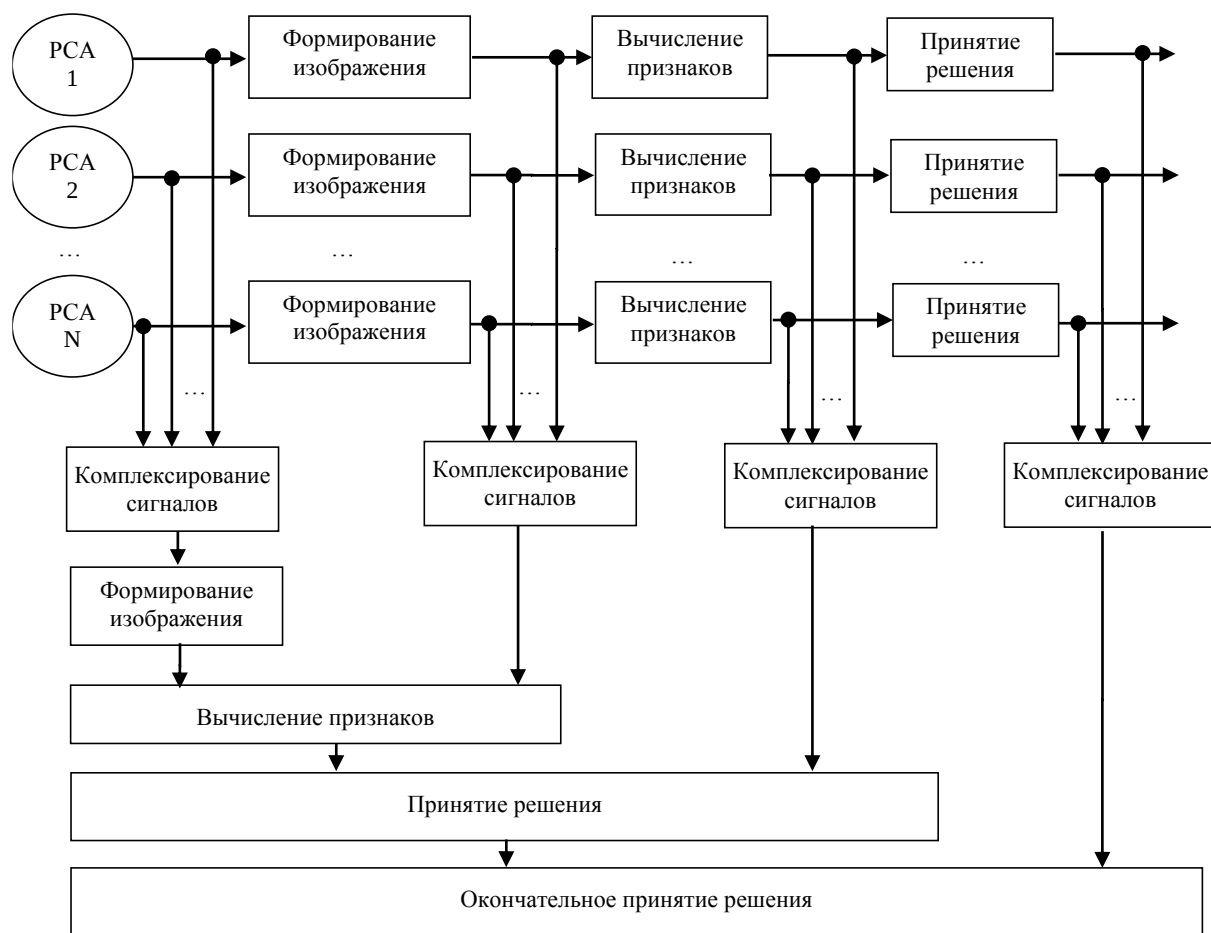


Рис. 6. Комплексирование РЛИ на всех уровнях принятия решения

Fig. 6. Radar complexing image at all decision-making levels

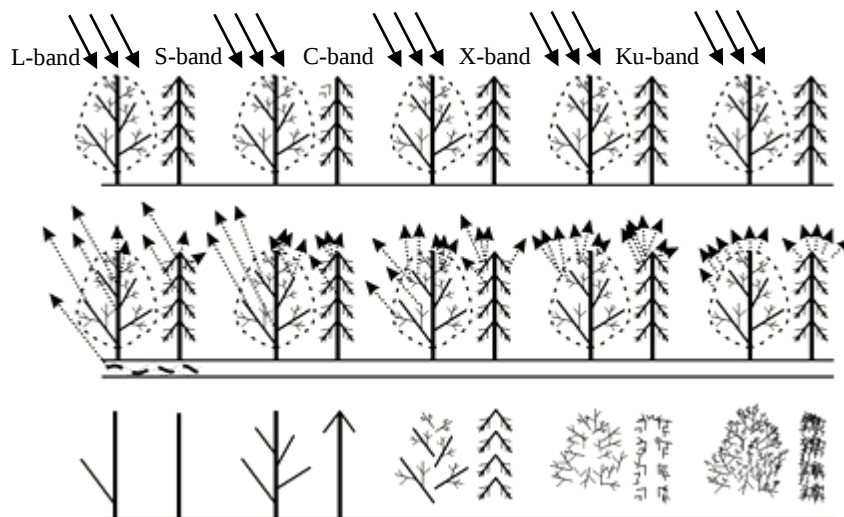


Рис. 7. Отражающие части дерева для различных диапазонов ЭМВ

Fig. 7. Reflective wood parts for different frequency bands

дом итерационных покрытий, выяснилось, что результат вычисления "верхних" покрытий (рис. 8) сопоставим с РЛИ, полученными с разным разрешением в разных частотных диапазонах.

Как видно из рис. 8, методы фрактальной теории органично вписываются в МД РСА, поскольку формируются изображения одного и того же участка местности на разных масштабах (длинах волн), по

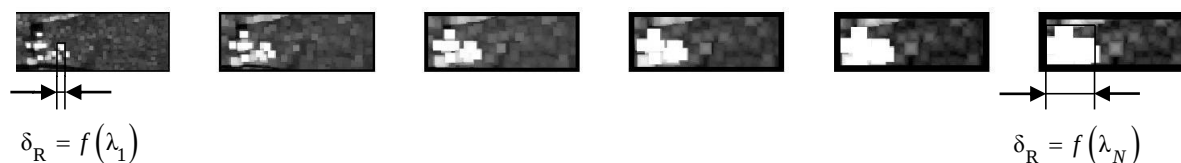


Рис. 8. Результаты вычисления "верхних" покрытий и идея их соответствия РЛИ разного разрешения

Fig. 8. Calculation of the "upper" coverings and the idea of their correspondence to radar images with different resolutions

которым возможно непосредственное обнаружение эффекта масштабной инвариантности и вычисление фрактальных и мультифрактальных сигнатур. Таким образом, появляется новая возможность фрактального анализа МД РЛИ, основой которого служит их фрактальное комплексирование – в предположении о том, что наземные объекты обладают (или наоборот, не обладают) масштабно-инвариантными свойствами.

В [22] предложен способ фрактального комплексирования РЛИ, сформированных одновременно в нескольких частотных диапазонах с разным разрешением. Согласно геометрии радиолокационной съемки (см. рис. 2) проводится зондирование участка подстилающей поверхности с некоторым "эталонным" объектом, размеры которого соответствуют цели зондирования, например воздушной радиолокационной разведке объектов бронетехники. Расчет синтезируемой апертуры проводится по (3) для каждого частотного канала РСА в отдельности для достижения требуемой разрешающей способности по дальности и азимуту.

В работе было предложено ранжировать исходные изображения в порядке убывания значений несущих частот или ширины спектра зондирующих сигналов, на которых они получены, а затем определять базовое изображение по критерию максимальной частоты зондирующего сигнала, как наиболее информативное.

Для каждого исходного n -го изображения необходимо вычислить масштаб согласно

$$\varepsilon_n = \left\lceil \frac{w_n - 1}{2} \right\rceil, \quad (5)$$

где $\lceil * \rceil$ – операция округления к большему; n – порядковый номер ранжированного изображения; $w_n = \lceil l_0 / \delta_n \rceil = \lceil 2\Delta f_n l_0 / c \rceil$ – число элементов изображения, соответствующих линейному размеру l_0 некоторого эталонного объекта; c – абсолютная

скорость распространения электромагнитных волн.

Участок сцены, соответствующий базовому изображению, согласно рис. 1, вырезается на остальных изображениях относительно середины интервалов накопления зондирующих сигналов T_{cn} (фазовых центров синтезированной апертуры антенн).

Поскольку для обеспечения одинаковой дальности обнаружения в каждом частотном канале РСА требуется различная мощность излучения, а также в случае различной чувствительности приемников РСА требуется выравнивание динамического диапазона РЛИ. С учетом вычисленных согласно (5) масштабов каждого РЛИ ε_n , их динамический диапазон может быть выравнен, например, согласно выражению

$$z_{\varepsilon n} = \frac{z_n - \min(z_n)}{\max(z_n) - \min(z_n)} + \varepsilon_n, \quad (6)$$

где $z_{\varepsilon n}$ – множество значений яркости элементов преобразованного n -го изображения с учетом масштаба; z_n – множество значений яркости элементов исходного n -го изображения; $\min(z_n)$ и $\max(z_n)$ – минимальное и максимальное значения яркости исходного n -го изображения соответственно.

Непосредственно комплексирование изображений с нормированным по (6) с учетом масштабов динамическим диапазоном проводится путем формирования поля фрактальных размерностей $D(i, j)$; $i = 1 \dots M$; $j = 1 \dots N$, для этого в скользящем окне размером $W \times W$, где W – нечетное целое число, рассчитывается локальная мультифрактальная размерность [23]

$$L_q = \frac{1}{|q|} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln[I(q, \varepsilon)]}{\ln(1/\varepsilon)}, \quad \text{при } q \neq 0, \quad (7)$$

где q – порядок скейлингового момента, при $q = 1$ локальная мультифрактальная размерность соответствует фрактальной размерности, при $q \neq 1$ выявляются мультифрактальные свойства, которые также возможно использовать при комплексировании; $I(q, \varepsilon) = \alpha \sum_i^W \sum_j^W \mu_\varepsilon(i, j)^q$ – обобщенная

статистическая сумма; $\alpha = \frac{\sum_i^W \sum_j^W |z_\varepsilon(i, j) - z(i, j)|}{\varepsilon_n - \varepsilon_B}$;

ε_B – масштаб базового изображения z ;

$$\mu_\varepsilon(i, j) = \frac{|z_\varepsilon(i, j) - z(i, j)|}{\sum_i^W \sum_j^W |z_\varepsilon(i, j) - z(i, j)|}.$$

Вычисленные таким способом по (7) значения L_q каждого центрального элемента скользящего окна запоминаются в соответствующем элементе двумерной матрицы $D(i, j); i = 1 \dots M; j = 1 \dots N$, $q = 1$, а в случае $q \neq 1$ – в соответствующем элементе трехмерной матрицы $D(q, i, j)$, содержа-

щей элементы исходных радиолокационных изображений одной и той же сцены, полученных одновременно в различных частотных диапазонах.

Результаты. В качестве примера фрактального комплексирования РЛИ многодиапазонной РСА на рис. 9, а–д приведены результаты обработки РЛИ одного и того же объекта, синтезированные на пяти разных частотах с различным разрешением. Рис. 9, е представляет собой результат комплексирования как поле фрактальных размерностей, вычисленное методом скользящего окна согласно (7) при $q = 1$. На рис. 9, ж, з представлены поля мультифрактальных размерностей при порядке скейлингового момента $q = 2$ и $q = 3$ соответственно.

Как следует из самой концепции такого способа комплексирования, заключающейся в задании априорной информации о размере объекта, данный подход можно использовать как вариант структурно-параметрического синтеза системы комплексирования МД РЛИ в целом. Предложенная в [22, 24] схема структурно-параметрического синтеза системы оптимальной текстурно-фрактальной обработки многомерных РЛИ представлена на рис. 10.

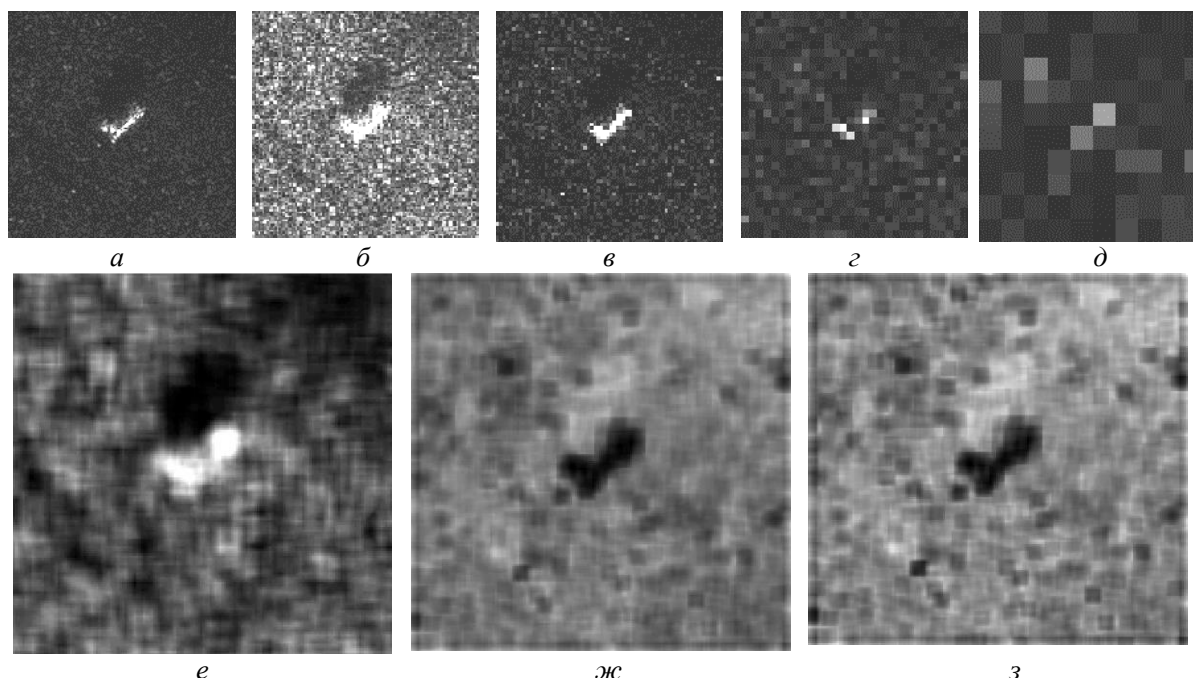


Рис. 9. Исходные РЛИ пяти каналов МД РСА (а–д) и результат комплексирования при $q = 1$ (е), $q = 2$ (ж), $q = 3$ (з)

Fig. 9. Initial radar images of five channels of multi-band SAR (a–d) and the result of fusion $q = 1$ (e), $q = 2$ (ж), $q = 3$ (з)

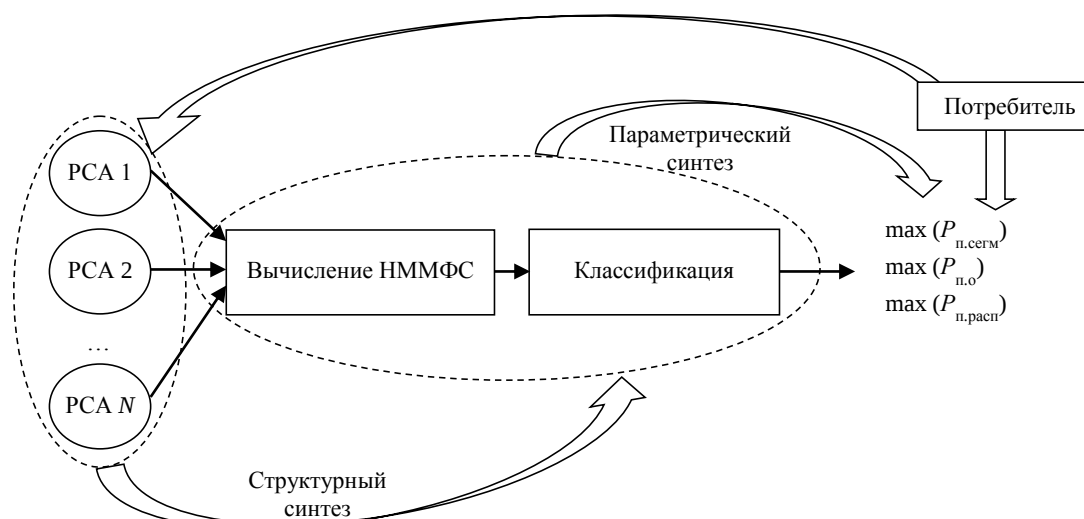


Рис. 10. Схема структурно-параметрического синтеза системы комплексирования МД РЛИ

Fig. 10. A scheme of the structural-parametric synthesis of a multi-band radar complexing image system

Согласно приведенной схеме, потребитель тематической информации сначала определяет целевую функцию – классификация (сегментация) подстилающей поверхности, обнаружение или распознавание объектов, определяемую требованиями к соответствующим вероятностям. На этой основе автоматически формируется состав сенсоров и структура вычислительной системы (структурный синтез), затем определяются параметры вычислителя, обеспечивающие заданные характеристики.

Заключение. Таким образом, в работе проведен системный анализ задачи комплексирования МД РЛИ, в процессе которого дан обзор принципов формирования сигналов и изображений в РСА, указаны особенности формирования РЛИ в различных диапазонах ЭМВ, приведены примеры существующих МД РСА, а также проведен анализ существующих способов комплексирования РЛИ, в результате чего сделан вывод о наличии характерных потерь информации на каждом из уровней принятия решения. В работе предложено использовать текстурно-фрактальный подход, заключающийся в учете масштабно-инвариантных свойств изображений при их формировании – в качестве масштаба изображения целесообразно использовать разрешающую способность РСА. Впервые

введен термин "фрактальное комплексирование", под которым понимается формирование результирующего изображения фрактальным методом, в отличие от известных на данный момент способов комплексирования по фрактальным признакам. Фрактальное комплексирование изображений проводится на основе модифицированного метода итерационных покрытий, в котором вместо верхних покрытий подаются сами изображения разного разрешения. Применение данного способа позволяет существенно повысить информативность систем ДЗЗ, особенно в случае постановки преднамеренных помех и маскирования объектов в некоторых или всех частотных диапазонах. Исходя из возможности «целевого» комплексирования предложен вариант структурно-параметрического синтеза системы комплексирования МД РЛИ. Для достижения требуемых полноты, достоверности и оперативности ДЗЗ с помощью МД РСА необходимо в дальнейшей работе обосновать критерий выбора числа диапазонов, рабочих частот и разрешающей способности, а также исследовать возможности решения задач обнаружения объектов и их распознавания по сформированным в результате комплексирования полям фрактальных и мультифрактальных размерностей.

Список литературы

1. Лихачев В. П., Купряшкин И. Ф., Рязанцев Л. Б. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением. М.: Радиотехника, 2020. 279 с.
2. Cheney M., Borden B. Synthetic Aperture Radar

- Imaging // In: Scherzer O. (eds) Handbook of Mathematical Methods in Imaging. New York: Springer, 2015. P. 763–799. doi: 10.1007/978-1-4939-0790-8_49
3. Soumekh M. Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MatLab Algorithms. New York: Wiley, 1999, 648 p.

4. Внотченко С. Л., Достовалов М. Ю. Авиационные мобильные малогабаритные радиолокаторы с синтезированной апертурой семейства «Компакт» (принципы реализации и опыт применения) // Журн. радиоэлектроники. 2009. № 10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct09/5/text.html> (дата обращения 27.04.2021)
5. Гурьянов М. А. Преобразование динамического диапазона радиолокационных изображений для различных снимаемых поверхностей // Журн. радиоэлектроники. 2014. № 12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/9/text.html> (дата обращения 27.04.2021)
6. Кузнецов В. А., Лихачев В. П., Унковский А. В. Алгоритм совмещения радиолокационных изображений по энтропии радиолокационных природных и антропогенных объектов в интересах двухпроходной интерферометрической радиолокационной станции с синтезированной апертурой антенны // Радиотехника. 2021. Т. 85, № 1. С. 104–111. doi: 10.18127/j00338486-202101-14
7. Пат. RU 2372627 C1 G01S 13/89 (2008.03). Способ получения двумерного радиолокационного изображения объекта в большом диапазоне изменения величин эффективных площадей рассеивания локальных центров при многочастотном импульсном зондировании / А. М. Блинковский, С. В. Крюков. Оpubл. 24.03.2009. Бюл. № 31.
8. Пат. RU 2520424 C2 G06T 5/40 (2012.07). Способ комплексирования цифровых многоспектральных изображений земной поверхности / О. Р. Никитин, А. Н. Кисляков, А. А. Шулятьев. Оpubл. 27.06.2014. Бюл. № 18.
9. Пат. RU 2540778 C1 G06T 5/50 (2013.10). Способ комплексирования цифровых полутоновых изображений / В. Н. Тикменов, С. В. Купцов, В. В. Лаптепа, И. А. Козлитин. Оpubл. 10.02.2015. Бюл. № 4.
10. Пат. RU 2692575 C1 G06T 5/50 (2018.01). Способ комплексирования цифровых полутоновых изображений / В. В. Шипко. Оpubл. 25.06.2019. Бюл. № 18.
11. Пат. RU 2342701 C2 G06K 9/40 (2007.08). Способ комплексирования цифровых многоспектральных полутоновых изображений / Е. И. Травина, И. Н. Фадеев. Оpubл. 27.12.2008. Бюл. № 36.
12. Karhe R. R., Chandratre Y. V. RADAR Image Fusion Using Wavelet Transform // International J. of Advanced Engineering, Management and Science (IJAEMS). 2016. Vol. 2, iss. 3. P. 4–13.
13. Simone G., Morabito F. C., Farina A. Multifrequency and Multiresolution Fusion of SAR Images for Remote Sensing Applications // Proc. of 4th International Conf. on Information Fusion, 2001. P. 1321–1327.
14. Multisensor Data Fusion. From Algorithms and Architectural Design to Applications / Ed. by H. Fourati, K. Iniewski. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2016. 663 p. doi: 10.1201/b18851
15. Мандельброт Б. Б. Фрактальная геометрия природы: пер. с англ. А. Р. Логунова / Ин-т компьютерных исследований. М., 2002. 656 с.
16. Потапов А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. М.: Университетская кн., 2005. 848 с.
17. Potapov A. A., Hao W., Shan X. Fractality of Wave Fields and Processes in Radar and Control. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2020. 280 p.
18. Гуляев Ю. В., Потапов А. А. Применение теории фракталов, дробных операторов, текстур, эффектов скейлинга и методов нелинейной динамики в синтезе новых информационных технологий для задач радиоэлектроники (в частности, радиолокации) // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64, № 9. С. 839–854.
19. Кузнецов В. А. Структура и свойства наземных объектов на изображениях PCA в задачах распознавания // Телекоммуникации. 2012. № 10. С. 31–38.
20. Кузнецов В. А., Потоцкий А. Н. Метод измерения направленной морфологической мультифрактальной сигнатуры текстуры изображений // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. № 3. С. 39–52.
21. Потапов А. А., Кузнецов В. А., Потоцкий А. Н. Новый класс топологических текстурно-мультифрактальных признаков и их применение для обработки радиолокационных и оптических малоконтрастных изображений // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 66, № 5. С. 457–467. doi: 10.31857/S0033849421050107
22. Пат. RU 2746038 C1 G06T 5/50 (2020.09). Способ фрактального комплексирования цифровых полутоновых изображений / А. А. Потапов, В. А. Кузнецов, Е. А. Аликулов. Оpubл. 06.04.2021. Бюл. № 10.
23. Xia Y., Feng D., Zhao R. Morphology-Based Multifractal Estimation for Texture Segmentation // IEEE Transactions on Image Processing. 2006. Vol. 15, iss. 3. P. 614–623. doi: 10.1109/TIP.2005.863029
24. Кузнецов В. А., Марюхненко В. С. Системный подход к решению проблемы фрактального анализа многомерных радиолокационных изображений // Сб. тр. XXIV Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь», 17–19 апр. 2018 г.: в 5 т. Воронеж: Вэлборн, 2018. Т. 2. С. 26–38.

Информация об авторах

Потапов Александр Алексеевич – доктор физико-математических наук (1994), главный научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук (2002), академик Российской академии естественных наук (2007), академик Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова (2008), почетный профессор Евразийского национального университета (Астана, Казахстан, 2010), почетный профессор Джинанского университета (Гуанджоу, Китай, 2011), президент совместной китайско-российской лаборатории информационных технологий и фрактальной обработки сигналов (2012), член Нижего-

родского математического общества (2017). Автор более 1150 научных работ в отечественных и зарубежных изданиях, в том числе двух патентов и 45 монографий и глав в книгах на русском и английском языках. Сфера научных интересов – статистическая радиофизика, рассеяние и дифракция электромагнитных волн, радиолокация, обработка и распознавание изображений и сигналов, детерминированный хаос, современная топология, фрактальный анализ, дробные операторы, эффекты скейлинга, фрактальные антенны, фрактальная электродинамика, фотоника, метаматериалы и метаповерхности.

Адрес: Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, ул. Моховая, д. 11, корп. 7, Москва, 125009, Россия

E-mail: potapov@cplire.ru

Кузнецов Виктор Андреевич – кандидат технических наук (2012), доцент кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования (2019) ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (Воронеж). Автор более 140 научных работ. Сфера научных интересов – системный анализ, распознавание образов, радиолокация, теория фракталов.

Адрес: ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, д. 54А, Воронеж, 394064, Россия

E-mail: kuzzvictor@mail.ru

Аликулов Елбек Абдукаимович – адъюнкт кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования (2019) ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (Воронеж). Автор более 10 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокация, фрактальное комплексирование.

Адрес: ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, д. 54А, Воронеж, 394064, Россия

E-mail: adunkt83@bk.ru

References

1. Lihachev V. P., Kuprjashkin I. F., Rjazancev L. B. *Malogabaritnye mnogofunkcional'nye RLS s nepreryvnym chastotno-modulirovannym izlucheniem* [Small-sized multifunctional radar with continuous frequency-modulated radiation]. M., *Radiotekhnika*, 2020. 279 p. (In Russ.)
2. Cheney M., Borden B. Synthetic Aperture Radar Imaging. In Scherzer O. (eds) *Handbook of Mathematical Methods in Imaging*. New York, Springer, 2015. doi: 10.1007/978-1-4939-0790-8_49
3. Soumekh M. *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms*. New York, Wiley, 1999, 648 p.
4. Vnotchenko S. L., Dostovalov M. Ju. Aviation mobile small-size synthetic aperture radars of the "Compact" family (implementation principles and application experience). *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of radio electronics]. 2009, vol. 10. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/oct09/5/text.html> (accessed 27.04.2021) (In Russ.)
5. Gur'janov M. A. Conversion of the dynamic range of radar images for various surveyed surfaces. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of radio electronics]. 2014, vol. 12. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/9/text.html> (accessed 27.04.2021) (In Russ.)
6. Kuznetsov V. A., Lihachev V. P., Unkovskij A. V. Matching radar images by the entropy of radar shadows of objects in the interests of two-pass interferometric survey. *Radiotekhnika* [Journal Radioengineering]. 2021, vol. 85, no. 1, pp. 104–111. doi: 10.18127/j00338486-202101-14 (In Russ.)
7. Blinkovskij A. M., Krjukov S. V. *Sposob poluchenija dvumernogo radiolokacionnogo izobrazhenija ob'ekta v bol'shom diapazone izmenenija velichin jeffektivnyh ploshhadej rasseivaniya lokal'nyh centrov pri mnogochastotnom impul'snom zondirovanii* [Method of obtaining two-dimensional radar image of object in wide range of Variation of values of effective scattering area of local centres during multifrequency pulsed probing]. Pat. RF 2372627. Publ. 24.03.2009. Bul. 31. (In Russ.)
8. Nikitin O. R., Kislyakov A. N., Shuljat'ev A. A. *Sposob kompleksirovaniya cifrovых mnogosppektral'nyh izobrazhenij zemnoj poverhnosti* [Method for complexing digital multispectral images of earth's surface]. Pat. RF 2520424. Publ. 27.06.2014. Bul. 18. (In Russ.)
9. Tikmenov V. N., Kupcov S. V., Lapteva V. V., Kozlitin I. A. *Sposob kompleksirovaniya cifrovых polutonoveryh izobrazhenij* [Method for integrating digital half-tone images]. Pat. 2540778. Publ. 10.02.2015. Bul. 4. (In Russ.)
10. Shipko V. V. *Sposob kompleksirovaniya cifrovых polutonoveryh izobrazhenij* [Method of integrating digital halftone images]. Pat. RF 2692575. Publ. 25.06.2019. Bul. 18. (In Russ.)
11. Travina E. I., Fadeev I. N. *Sposob kompleksirovaniya cifrovых mnogosppektral'nyh polutonoveryh izobrazhenij* [Method of complexing digital multispectral half-tone images]. Pat. RF 2342701. Publ. 27.12.2008. Bul. 36. (In Russ.)
12. Karhe1 R. R., Chandratre Y. V. RADAR Image Fusion Using Wavelet Transform. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science (IJAEMS)*. 2016, vol. 2, no. 3, pp. 4–13.

13. Simone G., Morabito F.C., Farina A. Multifrequency and Multiresolution Fusion of SAR Images for Remote Sensing Applications. Proc. of 4th International Conf. on Information Fusion. 2001, pp. 1321–1327.
14. *Multisensor Data Fusion. From Algorithms and Architectural Design to Applications*. Ed. by H. Fourati, K. Iniewski. Taylor & Francis Group, 2016, 663 p. doi: 10.1201/b18851
15. Mandel'brot B. B. *Fraktal'naja geometrija prirody* [Fractal geometry of nature]. M., Institut komp'yuternyh issledovaniy, 2002, 656 p. (In Russ.)
16. Potapov A. A. *Fraktaly v radiofizike i radiolokacii: Topologiya vyborki* [Fractals in Radiophysics and Radar: Sample Topology]. M., Universitetskaya kniga, 2005, 847 p. (In Russ.)
17. Potapov A. A., Hao W., Shan X. Fractality of Wave Fields and Processes in Radar and Control. Guangzhou, South China University of Technology Press, 2020, 280 p.
18. Guljaev Ju. V., Potapov A. A. Application of fractal theory, fractional operators, textures, scaling effects, and nonlinear dynamics methods in the synthesis of new information technologies in radio electronics (specifically, radiolocation). *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics]. 2019, vol. 64, no. 9, pp. 839–854. (In Russ.)
19. Kuznetsov V. A. Structure and properties of ground objects on SAR images in recognition problems. *Telekommunikacii* [Telecommunications]. 2012, vol. 10, pp. 31–38. (In Russ.)
20. Kuznetsov V. A., Pototskii A. N. Method of measuring directional morphological multifractal signatures of the texture images. *Uspehi sovremennoj radiojelektro-niki* [Telecommunications and Radio Engineering]. 2017, vol. 3, pp. 39–52. (In Russ.)
21. Potapov A. A., Kuznetsov V. A., Pototskii A. N. New Class of Topological Textural Multifractal Descriptors and Their Application for Processing Low-Contrast Radar and Optical Images. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2021, vol. 66, no. 5, pp. 581–590. doi: 10.1134/S1064226921050090
22. Potapov A. A., Kuznetsov V. A., Alikulov E. A. *Sposob fraktal'nogo kompleksirovaniya cifrovyyh polutonovykh izobrazhenij* [Method for fractal complexing of multifrequency radar images]. Pat. RF 2746038. Publ. 06.04.2021. Bul.10. (In Russ.)
23. Xia Y., Feng D., Zhao R. Morphology-Based Multifractal Estimation for Texture Segmentation. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2006, vol. 15, no. 3, pp. 614–623. doi: 10.1109/TIP.2005.863029
24. Kuznetsov V. A., Maryuhnenko V. S. *Sistemnyy podhod k resheniju problemy fraktal'nogo analiza mnogomernykh radiolokacionnykh izobrazhenij* [System approach to solving the problem of multidimensional radar images fractal analysis]. Proc. XXIV Int. Scientific-technical Conference "Radiolocation, navigation, communication" 17–19 Apr. 2018. Voronezh, Vjelborn, 2018, vol. 2, pp. 26–38. (In Russ.)

Information about the authors

Alexander A. Potapov, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (1994), Chief Research of V. A. Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences (2002), Academician of Russian Academy of Natural Sciences (2007, Russia), Academician of the Academy of engineering science of A. M. Prokhorov (2008, Russia), Honorary Professor of the Eurasian National University (Kazakhstan, Astana, 2010), Honorary Professor of the University of Jinan (China, Guangzhou, 2011). President of the Sino-Russian Laboratory of Informational Technologies and Signals Fractal Processing (2012), member of the Nizhny Novgorod Mathematical Society (2017). Author of over 1150 scientific publications in domestic and foreign publications, including two patents and 45 monographs and chapters in books in Russian and English. Area of expertise: statistical radio physics, scattering and diffraction of electromagnetic waves, radar, image and signal processing and recognition, deterministic chaos, modern topology, fractal analysis, fractional operators, scaling effects, fractal antennas, fractal electrodynamics, photonics, metamaterials and metasurfaces.

Address: V. A. Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, 11-7 Mokhovaya St., Moscow, 125009 Russia

E-mail: potapov@cplire.ru

Viktor A. Kuznetsov, Cand. Sci. (Eng.) (2012), Assistant professor (2019). Author of over 140 scientific publications. Area of expertise: systems analysis, pattern recognition, radar, fractal theory.

Address: MERC AF Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin, 54A Starykh Bolshevikov St., Voronezh, 394064 Russia

E-mail: kuzzviktor@mail.ru

Elbek A. Alikulov, postgraduate (2019). Author of over 10 scientific publications. Area of expertise: radar, fractal radar image fusion.

Address: MERC AF Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin, 54A Starykh Bolshevikov St., Voronezh, 394064 Russia

E-mail: adunkt83@bk.ru

Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов

УДК 621.396.969.36

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-22-38>

Макет автомобильного радара диапазона 77 ГГц

О. И. Буренева¹, И. Г. Горбунов², Г. В. Комаров^{2✉},
А. А. Коновалов², М. С. Куприянов¹, Ю. А. Шичкина¹

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

² НИИ "Прогноз", Санкт-Петербург, Россия

✉ komarov_gleb@list.ru

Аннотация

Введение. Автомобильные радары в настоящее время являются одним из основных средств обеспечения безопасности автомобильного движения. Их разработка сталкивается с целым рядом технических сложностей, связанных с изготовлением высокоточных печатных плат КВЧ-диапазона. Для ускорения и удешевления создания таких устройств целесообразно отладить алгоритмы обработки радиолокационной информации на макетных устройствах от производителей трансиверов миллиметрового диапазона. Однако параметры таких плат заранее неизвестны, а условия работы автомобильного радара ставят перед вторичной обработкой новые вызовы, поэтому проверка их работоспособности является актуальной задачей.

Цель работы. Оценка работоспособности макета автомобильного радара миллиметрового диапазона и тестирование алгоритмов вторичной обработки на макете автомобильного радара.

Материалы и методы. Использована оригинальная методика вторичной обработки радиолокационной информации с учетом ограничений на применение дополнительных источников данных о движении носителя радара.

Результаты. Проведена экспериментальная оценка работоспособности макета автомобильного радара диапазона 77 ГГц, проверка эффективности первичной обработки для класса целей "автомобиль" в миллиметровом диапазоне, предложены и апробированы оригинальные алгоритмы вторичной обработки радиолокационной информации.

Заключение. Полученные результаты показывают, что возможности макетной платы микросхемы-трансивера позволяют проводить апробацию алгоритмов вторичной обработки без создания собственного опытного образца автомобильного радара. Таким образом, время разработки может быть существенно уменьшено, а после создания собственного аппаратного решения у разработчиков есть образцовое изделие, что позволяет проводить проверки и настройки собственного продукта без использования крайне дорогого и редкого оборудования КВЧ-диапазона.

Ключевые слова: ADAS, линейный частотно-модулированный сигнал, автомобильный радар, адаптивное пороговое устройство, траекторное сопровождение, полярные координаты, фильтр Калмана

Для цитирования: Макет автомобильного радара диапазона 77 ГГц / О. И. Буренева, И. Г. Горбунов, Г. В. Комаров, А. А. Коновалов, М. С. Куприянов, Ю. А. Шичкина // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 3. С. 22–38. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-22-38

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 13.04.2021; принята к публикации после рецензирования 19.05.2021; опубликована онлайн 29.06.2021



A Prototype of Automotive 77 GHz Radar

Olga I. Bureneva¹, Igor G. Gorbunov², Gleb V. Komarov^{2✉},
Aleksandr A. Konovalov², Mikhail S. Kupriyanov¹, Yulia A. Shichkina¹

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² Research Institute "Prognoz", St Petersburg, Russia

✉ komarov_gleb@list.ru

Abstract

Introduction. Automotive radars are the main tools for providing traffic safety. The development of such radars involve a number of technical difficulties due to the manufacture of high-precision extremely high-frequency (EHF) printed circuit boards. To facilitate the process of creating such devices, the existing algorithms for radar information processing should be debugged using prototypes from manufacturers of mm-band transceivers. However, the parameters of such boards are not known in advance, and the actual operating conditions of the as-produced automotive radars raise new challenges to target tracking algorithms. Therefore, checking the performance of such boards is a relevant research problem.

Aim. To evaluate the performance of a millimeter-wave automotive radar prototype and to test target tracking algorithms using this prototype.

Materials and methods. An original target tracking method was used, which considers the constraints on the use of additional data sources about the radar carrier movement.

Results. An experimental performance evaluation of a 77 GHz automotive radar prototype was carried out. The effectiveness of primary processing for the target class "vehicle" in the millimetre range was checked. Original algorithms for target tracking were proposed and tested.

Conclusion. The obtained results show that the prototype board of a transceiver chip is capable of testing tracking algorithms without creating an own automotive radar prototype. Thus, the developmental process can be significantly shortened. Moreover, after creating a hardware solution, the developer obtains a reference device to test and configure an own product without using extremely expensive and rare EHF equipment.

Keywords: ADAS, frequency-modulated continuous wave signal, automotive radar, constant false alarm rate algorithm, target tracking, polar coordinates, Kalman filter

For citation: Bureneva O. I., Gorbunov I. G., Komarov G. V., Konovalov A. A., Kupriyanov M. S., Shichkina Yu. A. A Prototype of Automotive 77 GHz Radar. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 3, pp. 22–38. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-22-38

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

Submitted 13.04.2021; accepted 19.05.2021; published online 29.06.2021

Введение. Все более широкое распространение в современных автомобилях приобретают системы помощи водителю (ADAS) с использованием радиолокационных датчиков [1]. Наиболее перспективными признаны автомобильные радары с широкополосным линейным частотно-модулированным сигналом, работающие в полосе 77...81 ГГц. Использование такого высокочастотного диапазона имеет свои недостатки. При уменьшении габаритов и улучшении параметров антенных систем повышаются потери в линиях

передачи и диэлектрических материалах, уменьшаются геометрические размеры элементов антенного тракта, существенно усложняется реализация СВЧ-элементов, повышаются требования к технологическим процессам, используемых при производстве СВЧ-тракта радиолокатора. Малая длина волны усложняет защиту от пассивных и активных помех, выделение и классификацию целей, что ужесточает требования к обработке сигнала, к скорости обработки и передачи данных. Все это приводит к удорожанию конечной про-

дукции, неприемлемому для целей массового внедрения радиолокационных датчиков ADAS. В статье рассматривается возможность построения автомобильного радара на основе достаточно несложного и недорогого макета радара диапазона 77 ГГц с применением усовершенствованных алгоритмов вторичной обработки, позволяющих получить приемлемые характеристики обнаружения и классификации целей в дорожной обстановке.

Аппаратное и программное обеспечение экспериментов. Для получения экспериментальных данных использовался макет радара с линейным частотно-модулированным (ЛЧМ) сигналом диапазона 77 ГГц на базе платы сбора данных и приемопередающего модуля фирмы "Calterah" (Китай). Плата приемопередающего модуля Jupiter-S с антенной решеткой представлена на рис. 1, а (фото производителя). Высоко-частотный тракт ЛЧМ-сигнала реализован на микросхеме CAL77A2T4R фирмы "Calterah", специально разработанной для применения в автомобильных радарах, функциональная диаграмма чипа приведена на рис. 1, б.

Микросхема CAL77A2T4R содержит 2 передатчика (TX) и 4 приемника (RX), работающих в диапазоне 76...81 ГГц, встроенные ГУН и петлю ФАПЧ для формирования линейного частотно-модулированного сигнала. Максимальная выходная мощность TX 13 дБм. Полоса приемного тракта по выходу до 10 МГц. Антенна (рис. 1, а) состоит из двух передающих антенн, состоящих, в свою очередь, из двух и 10 (образующих две подрешетки) столбцов и приемной решетки из четырех столбцов. Благодаря этому можно

реализовать как "широкую" диаграмму направленности (ДН) на передачу с использованием двух столбцов при работе радара в ближней зоне, так и "узкую" ДН в дальней зоне при подаче зондирующего сигнала на решетку из 10 столбцов. Приемная решетка, подключенная к четырем RX-каналам, обеспечивает возможность формирования приемной ДН при помощи цифрового диаграммоформирования. Управление работой радара, обмен данными с компьютером и отображение информации обеспечивает плата сбора и обработки данных DCK Calterah. Плата сбора данных имеет в составе 4-канальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и SoC обработки сигнала фирмы "Xilinx".

Опционально может осуществляться запись "сырого" принятого сигнала непосредственно с выходов АЦП с помощью платы сбора данных (Radar Development Platform – RDP) от "Calterah", имеющей скоростной параллельный интерфейс 5 Гбайт/с для передачи оцифрованных данных на плату Data Collection Kit (DCK) с дальнейшей их передачей на компьютер по USB 3.0.

Управление, настройка режимов радара, изменение параметров сигнала, запись данных осуществляются с помощью ПО Calterah. Вид интерфейса при работе с радаром представлен на рис. 2.

Пространственно-временная цифровая обработка ЛЧМ-сигнала. Первичная обработка сигнала производится средствами платы сбора и обработки данных DCK. Для вторичной обработки в пакете MatLab производилась запись кодаграмм обнаруженных целей в файл данных.

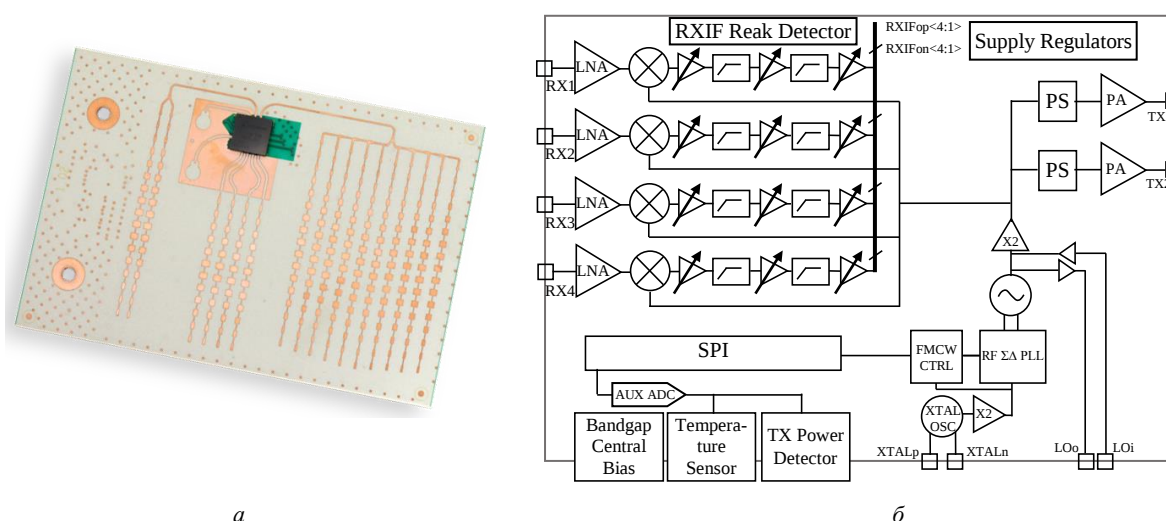


Рис. 1. Приемопередающий модуль с антенной: а – антенна; б – блок-схема приемопередатчика

Fig. 1. Block scheme of the transceiver module and the antenna array: а – antenna; б – block scheme of the transceiver

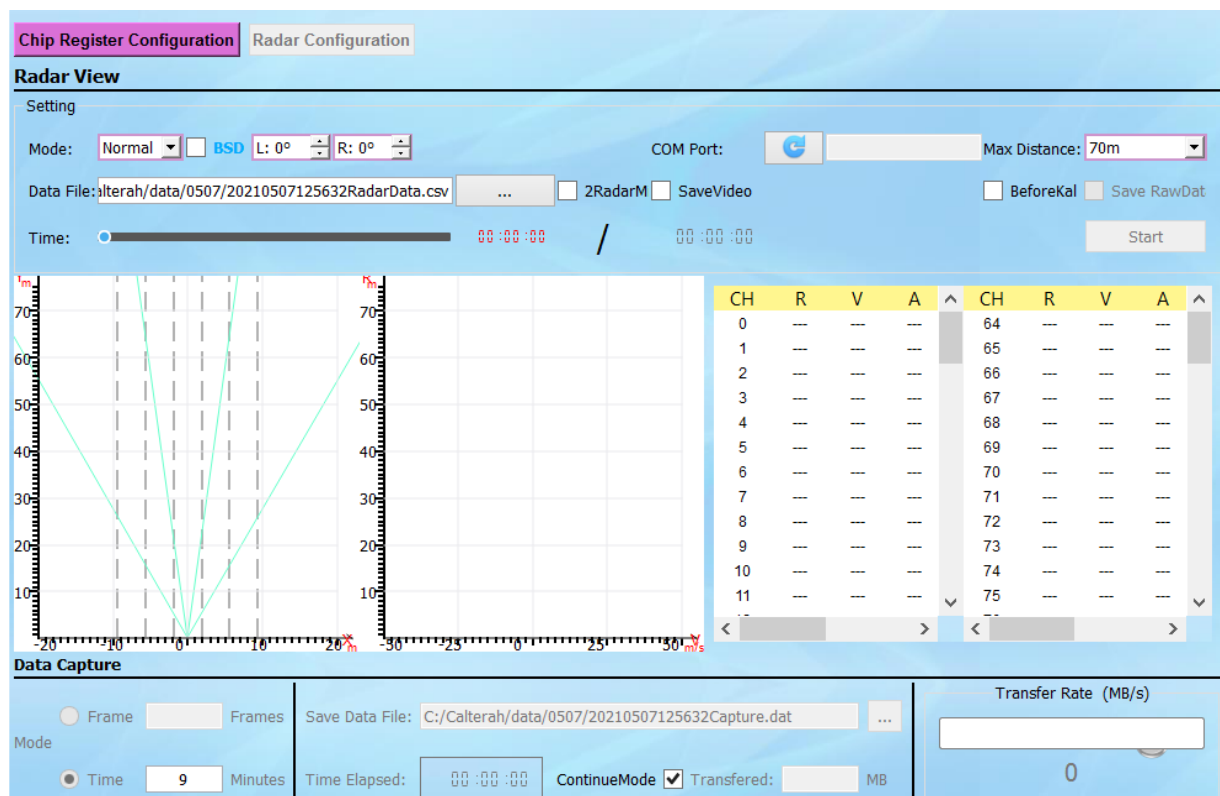


Рис. 2. Интерфейс программного обеспечения радара

Fig. 2. Radar display interface

Принципы обнаружения. На рис. 3 показаны временные диаграммы изменения частоты зондирующего (1) и отраженного (2) ЛЧМ-сигналов. Закон изменения частоты отраженного сигнала определяется временной задержкой Δt и доплеровским сдвигом частоты, обусловленным движением цели относительно радара, Δf_v . Общий сдвиг частоты отраженного сигнала $\Delta f_\Sigma = \Delta f_v + \Delta f_R$, где Δf_R – сдвиг частоты, обусловленный временной задержкой.

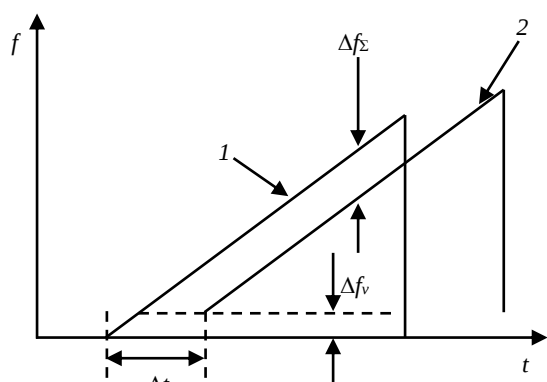


Рис. 3. Закон изменения частоты отраженного ЛЧМ-сигнала

Fig. 3. Examination the transmitted and received FMCW signal frequency

Компоненты общего частотного сдвига определяются как $\Delta f_v = \frac{2f_c v}{c}$; $\Delta f_R = \frac{2RB}{cT}$, где f_c – частота излучаемого сигнала; B – девиация частоты ЛЧМ-сигнала; c – скорость света; T – длительность единичного импульса; R – расстояние до цели. При этом для больших значений B выполняется $\Delta f_R \gg \Delta f_v$, кроме малых дистанций. Чтобы избавиться от неоднозначности по дальности и доплеровской частоте, необходимо сгенерировать пачку из N последовательных импульсов (рис. 4).

Обнаружение цели основано на выделении компонент частотного сдвига принятого сигнала, обусловленных доплеровской частотой и расстоянием, с помощью двумерного быстрого преобразования Фурье (БПФ), которое производится над каждым импульсом в пачке и над всей пачкой из N

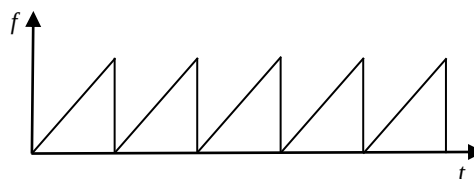


Рис. 4. Генерирование пилообразного ЛЧМ-сигнала

Fig. 4. Generation of triangular FMCW waveforms

импульсов. На выходе получаем для каждого луча приемной антенной решетки двумерную матрицу в координатах дальность–скорость, элементами которой являются амплитуды спектральных составляющих принятого сигнала.

Предварительная обработка сигнала. Для устранения помех и искажений, вызванных несовершенством приемного тракта макета, принятый сигнал подвергается обработке во временной и частотной областях: фильтрации, преобразованию в частотную область, пороговой обработке. Обработка производится отдельно для каждого из четырех лучей антенной решетки с последующим цифровым формированием диаграммы. Отсчеты входного сигнала поступают по четырем каналам АЦП.

Гомодинный приемник макета радара осуществляет перенос принятого сигнала на нулевую частоту. При этом наряду с сигналом разностной частоты, соответствующим отраженному от объекта сигналу, присутствует и остаток прямого сигнала. Он представляет собой низкочастотную помеху, которая может препятствовать обнаружению сигнала на малых дистанциях ввиду перекрытия низкочастотных составляющих полезного сигнала мощными спектральными составляющими помехи. Для подавления этой помехи используется фильтр высоких частот (ФВЧ) с полосой заграждения, обеспечивающей необходимую минимальную дальность

обнаружения цели. В данном случае на ПЛИС реализован цифровой КИХ-фильтр, полоса заграждения которого явно велика, что приводит к потерям медленно движущихся целей.

Отсчеты сигнала в одном луче антенной решетки взвешиваются с помощью временного окна Блэкмана и подаются на вычислитель двумерного БПФ (рис. 6).

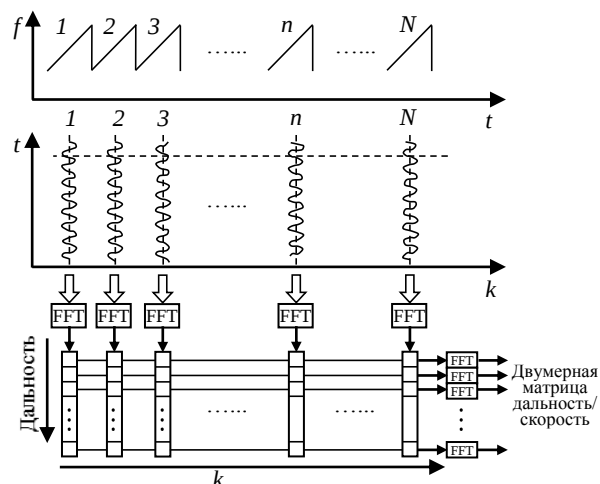


Рис. 6. Пояснение к вычислению двумерного БПФ

Fig. 6. Two-dimensional FFT explanation

Размерность БПФ 512×256 . Учитывая, что первому преобразованию подвергается действительный сигнал, спектр которого симметричен, далее обрабатывается половина отсчетов, соответственно размер выходного массива данных 256×256 отсчетов спектра.

Амплитудное детектирование сигнала производится с помощью алгоритма CORDIC (COordinate Rotation DIgital Computer), так как при необходимости переноса алгоритмов на базу ПЛИС удобно использовать типовое ядро ПЛИС, поставляемое в составе системы автоматизированного проектирования.

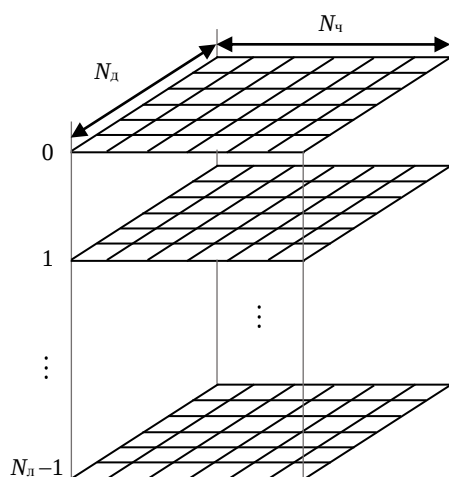


Рис. 5. Массив данных после двумерного БПФ для всех лучей антенной решетки: N_l – число лучей; N_d – число отсчетов по дальности; N_c – число отсчетов по частоте Доплера

Fig. 5. Data sets after two-dimensional FFT for all antenna beams: N_l – beams number; N_d – number of points by distance; N_c – number of points by Doppler shift

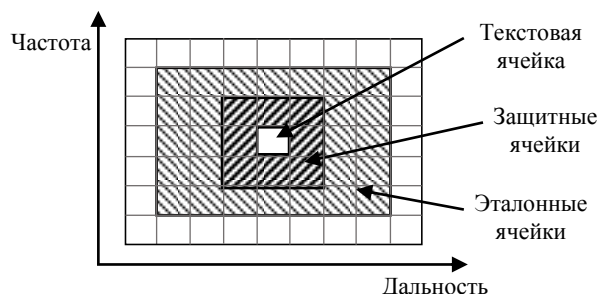


Рис. 7. Обобщенный алгоритм CFAR в плоскости дальность/частота Доплера для одного луча антенной решетки

Fig. 7. Principle of the CA-CFAR algorithm in the range/frequency domain within one antenna beam

Обнаружение цели осуществляется адаптивным пороговым устройством (АПУ), построенным на известном алгоритме, обеспечивающем постоянный уровень ложных тревог CFAR (Constant False Alarm Rate) [2]. Для реализации АПУ выбран алгоритм с вычислением среднего CA CFAR с механизмом защитных ячеек (рис. 7).

Обнаружение сигнала ведется в скользящем окне размера $N \times M$ (N и M – нечетные) для центральной k -й ячейки. При этом окружающие ячейки являются защитными и не участвуют в расчете интенсивности шума. Оценка неизвестной интенсивности шума осуществляется усреднением квадратов амплитуд эталонных ячеек:

$$z_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2.$$

Значение тестовой ячейки сравнивается с порогом T_0 , вычисленным как произведение оценки z_k и параметра настройки α :

$$T_0 = \frac{\alpha}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2.$$

Значение коэффициента α обеспечивает требуемую вероятность ложной тревоги при заданном размере окна N [3]:

$$\alpha = N \left(P_f^{-1/N} - 1 \right).$$

Поскольку обработка ведется в двумерном окне, то необходимо суммировать эталонные ячейки в двух измерениях. Выбор размера окна $N \times M$ осуществляется эмпирически, как компромисс между уменьшением потерь и снижением задержки.

Значения исследуемых ячеек z_k сравниваются с порогом T_0 , в ячейках, превышающих порог, фиксируется наличие цели. Для этих ячеек их координаты (дальность, доплеровская частота, время получения отметки) записываются в файл данных и передаются алгоритмам вторичной обработки радиолокационной информации. Процедура обработки производится для всех лучей антенной решетки.

Вторичная обработка. Траекторное сопровождение в автомобильном радаре. РЛС обнаруживает цели в заданной зоне обзора и измеряет их дальность r , азимут α и радиальную скорость v_r . Измерения производятся через временной

интервал, соответствующий периоду обзора РЛС. Все измерения на обзоре являются одновременными. Задача траекторной обработки заключается в обнаружении и построении траекторий подвижных объектов, находящихся в зоне действия РЛС, с получением оценки параметров их движения (координаты, скорость, при необходимости – ускорение) [4, 5].

Выбор системы координат. Традиционно в системах траекторного сопровождения, и в автомобильных радарх в частности, используется декартова (прямоугольная) система координат (ДСК) [6, 7]. Достоинством ДСК является то, что в ней прямолинейное движение цели описывается линейными разностными уравнениями, что дает возможность использовать для фильтрации линейные траекторные фильтры, например фильтр Калмана [8]. Однако именно для автомобильных радаров выбор в пользу ДСК представляется не очевидным. Прежде всего, дороги содержат не только линейные участки, но и криволинейные, описываемые сложными кривыми – клотоидами (дугами с переменным радиусом) [9]. Модели, описывающие движение по клотоиде, существенно нелинейны и требуют применения нелинейных алгоритмов фильтрации [10].

Вторая, и более существенная сложность – учет собственного движения носителя РЛС. При сопровождении в ДСК измерения дальности и азимута некоторого объекта, полученные на очередном обзоре, преобразуются в ДСК, связанную с текущим положением носителя. Экстраполированная отметка выражена в ДСК, связанной с положением объекта на предыдущем обзоре. Поскольку при отождествлении необходимо связать между собой измерения, полученные на разных обзорах, возникает необходимость учета перемещения носителя за время между обзорами. Наиболее предпочтительным вариантом является измерение координат носителя на каждом обзоре при помощи, например, приемника GPS, однако этот вариант ненадежен, поскольку сигналы GPS не всегда доступны (например, в тоннелях) и могут не обладать достаточной точностью. Другой вариант – разработка собственной инерциальной навигационной системы, работающей по сигналам как от спутника, так и от различных датчиков, установленных на автомобиле, либо использование информации от датчиков напрямую. В составе оборудования автомобиля имеются датчики скорости вращения колес и скорости

поворота относительно осей вращения [11], дополнительно можно задействовать акселерометры. Однако при этом возникает ряд проблем, связанных с адекватностью используемой информации: зависимость оценки скорости носителя датчиком скорости вращения колес от диаметра колес; учет пробуксовки, сноса и скольжения; учет вклада производных по координатам выше второй и т. д. [12]. В любом случае учет движения носителя, который является обязательным для сопровождения в ДСК, требует принятия специальных мер по организации доступа к необходимой информации надлежащего качества, а также адекватного учета погрешностей этих измерений в ходе траекторной обработки.

Наличие проблем, возникающих при учете собственного движения носителя, и отсутствие простых методов их решения побуждают рассмотреть вариант сопровождения в полярной системе координат (ПСК), при котором фильтрации подлежат измеряемые параметры: дальность, азимут и радиальная скорость. Основное ее преимущество в том, что построение траекторий может осуществляться без сторонней информации. Помимо этого схема сопровождения в ПСК обладает рядом дополнительных достоинств. Прежде всего отметим возможность раздельной фильтрации каждой координаты, соответственно дальности, азимута и радиальной скорости, поскольку их измерения независимы. При сопровождении в ДСК обычно используется модель с постоянным ускорением (модель Constant Acceleration, CA), в которой оцениваются координата, скорость и ускорение по осям x и y . В результате вектор состояния включает в себя 6 параметров, размер обрабатываемых ковариационных матриц равен 6×6 . При сопровождении в ПСК при использовании той же модели CA параллельно работают 3 фильтра размерности 3, что существенно снижает вычислительные требования и позволяет распараллеливать вычисления. Наконец, схему сопровождения в ПСК легко распространить на случай отсутствия измерений азимута.

Основным возражением против сопровождения в полярных координатах является нелинейный характер изменения этих координат во времени. Однако для многих практических ситуаций задача заметно упрощается. Рассмотрим следующий пример. Носитель радара движется по двухполосной проезжей части со скоростью 10 м/с, мимо него по встречной полосе проезжает автомобиль

со скоростью 25 м/с. На рис. 8 тонкой черной линией показаны истинные значения дальности, азимута и радиальной скорости цели относительно носителя в зависимости от времени, а жирной – участок, который соответствует зоне видимости автомобильного радара (режим дальней зоны – синий цвет, режим ближней зоны – красный). Зона обзора по горизонтали в режиме дальней зоны: $\pm 6^\circ$ при дистанции 180 м, в режиме ближней зоны – $\pm 45^\circ$ при дистанции 20 м.

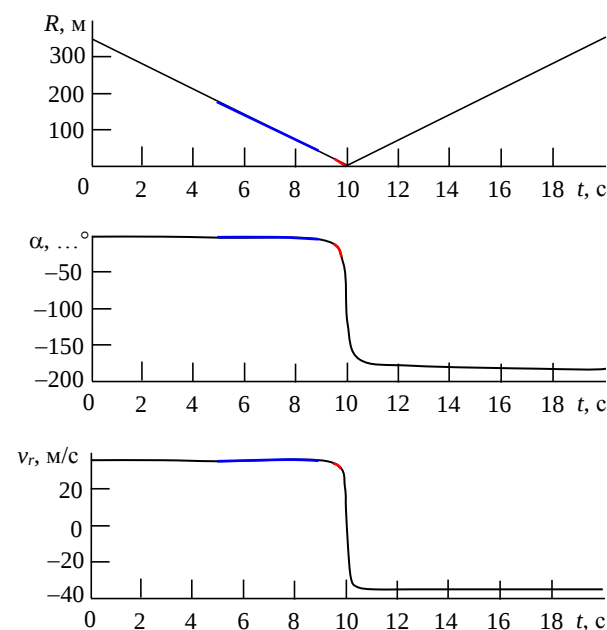


Рис. 8. Значения измеряемых параметров на рабочих участках при встречном прямолинейном движении автомобилей

Fig. 8. Parameter values for vehicles coming linear from the opposite directions

Из представленных графиков следует, что рабочие участки для дальней зоны находятся преимущественно на линейных участках кривых (за исключением слабой нелинейности у азимута). Что касается ближней зоны, то, во-первых, для встречной цели получается крайне небольшое число отметок (в данном примере при скорости сближения 35 м/с всего 4), во-вторых, рабочий участок имеет относительно слабую нелинейность, которая при необходимости будет скомпенсирована использованием модели с постоянным ускорением, аппроксимирующей рабочий участок кривой полиномом второго порядка. Примерно такая же ситуация будет для случая попутного движения. При совершении носителем и целью маневров (перестроение из полосы в полосу, линейное ускорение) характер кривых становится более изломанным, однако и

в этом случае успешное сопровождение вполне достижимо (например, за счет использования методов сопровождения маневрирующей цели).

Общая схема траекторного сопровождения в ПСК. Согласно предлагаемой схеме сопровождения считается, что каждая координата – дальность ρ , азимут α , радиальная скорость v_r – эволюционирует во времени согласно модели с постоянным детерминированным ускорением, т. е. с постоянной второй производной по этой координате (может иметь и нулевое значение) и случайным ускорением в виде белого гауссовского шума с нулевым средним (модель СА). Заметим, что строящаяся траектория описывает движение цели не в физическом пространстве (т. е. не на дороге), как это было бы при сопровождении в ДСК, а в пространстве измеренных координат.

Траекторию движения цели образует последовательность полярных измерений, отнесенных к одному объекту. На каждом обзоре на схему траекторной обработки поступает набор отметок, содержащих измерения дальности, азимута и радиальной скорости. Траектории целей, также выраженные в этих координатах, экстраполируются на момент текущего обзора; новые и экстраполированные отметки отождествляются между собой обычным образом; отметки, присвоенные траекториям, уточняются (фильтруются). Отметки, не присвоенные существующим траекториям, служат для начала обнаружения новых траекторий, состоящего из завязки и подтверждения [13]. Результат траекторной обработки на очередном обзоре – текущие оценки положения и скорости целей – может быть выражен в ПСК либо преобразован в прямоугольную СК с получением текущих координат цели (x, y) в ДСК, связанной с текущим положением и ориентацией носителя. Непосредственно после преобразования может быть получен только двумерный вектор пространственных координат, для нахождения вектора скорости в ДСК необходима информация о перемещении носителя за время между обзорами. Если такая информация есть, ее можно использовать также для компенсации искажения измерений координат цели, вызванных маневрами носителя.

Рассмотрим работу алгоритма траекторного сопровождения в ПСК более подробно.

Модели состояния и наблюдения. Вектор состояния $\mathbf{x}$ описывает состояние объекта, вектор

измерения $\mathbf{z}$ содержит измеряемые параметры объекта. Реализуется раздельная фильтрация по каждой координате согласно модели СА. Постоянная составляющая вторых производных по координатам моделируется некоторой оцениваемой на каждом шаге детерминированной величиной, случайная – гауссовской случайной величиной с нулевым средним, их дисперсии $\sigma_{\ddot{\rho}}^2$, $\sigma_{\ddot{\alpha}}^2$, и $\sigma_{\ddot{v}_r}^2$ считаются известными.

Векторы измерения отдельных фильтров:
 $\mathbf{z}_\rho = [\rho]$, $\mathbf{z}_\alpha = [\alpha]$, $\mathbf{z}_{v_r} = [v_r]$.

Векторы состояния отдельных фильтров:
 $\mathbf{x}_\rho = [\rho, \dot{\rho}, \ddot{\rho}]^T$, $\mathbf{x}_\alpha = [\alpha, \dot{\alpha}, \ddot{\alpha}]^T$, $\mathbf{x}_{v_r} = [v_r, \dot{v}_r, \ddot{v}_r]^T$.

Объединенный вектор измерения:
 $\mathbf{z} = [\rho, \alpha, v_r]^T$.

Объединенный вектор состояния:
 $\mathbf{x} = [\rho, \alpha, v_r, \dot{\rho}, \dot{\alpha}, \dot{v}_r, \ddot{\rho}, \ddot{\alpha}, \ddot{v}_r]^T$.

Уравнения движения: $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}\mathbf{x}_k + \mathbf{G}\mathbf{v}_k$, где

$$\mathbf{x} - \text{один из } \mathbf{x}_\rho, \mathbf{x}_\alpha, \mathbf{x}_{v_r}; \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & \tau & \tau^2/2 \\ 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} -$$

матрица экстраполяции; τ – интервал между моментами времени t_k и t_{k+1} ;

$\mathbf{G} = [\tau^2/2 \quad \tau \quad 1]^T$ – вектор учета случайных ускорений; $\mathbf{v}_k$ – случайное ускорение по данной координате, белый гауссовский шум $\mathbf{v} \sim N(0, \sigma_q^2)$, σ_q^2 – одна из $\sigma_{\ddot{\rho}}^2$, $\sigma_{\ddot{\alpha}}^2$, и $\sigma_{\ddot{v}_r}^2$.

Уравнения наблюдения: $\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k$, где

$\mathbf{z}$ – один из $\mathbf{z}_\rho, \mathbf{z}_\alpha, \mathbf{z}_{v_r}$; $\mathbf{H} = [1 \quad 0 \quad 0]$ – вектор наблюдения;

$\mathbf{w}_k$ – шум измерения данной координаты, белый гауссовский шум $\mathbf{v} \sim N(0, \sigma^2)$;

σ^2 – одна из $\sigma_{\ddot{\rho}}^2$, $\sigma_{\ddot{\alpha}}^2$ и $\sigma_{\ddot{v}_r}^2$.

Подчеркнем, что $\sigma_{\ddot{\rho}}^2$, $\sigma_{\ddot{\alpha}}^2$ и $\sigma_{\ddot{v}_r}^2$ – это дисперсии погрешностей измерений, т. е. параметры радара как измерительного устройства, а $\sigma_{\ddot{\rho}}^2$, $\sigma_{\ddot{\alpha}}^2$ и $\sigma_{\ddot{v}_r}^2$ – это дисперсии случайных ускорений, т. е. параметры модели, используемой в траекторном сопровождении. Первые должны быть

заданы, вторые являются параметрами настройки траекторного сопровождения.

В ходе траекторного сопровождения над полученным на очередном обзоре данными выполняются операции отождествления, фильтрации, обнаружения траекторий, проверки критерия сброса.

Отождествление (ассоциация) данных в ходе траекторного сопровождения заключается в нахождении однозначного соответствия между обнаруженными на обзоре отметками и находящимися в системе траекториями. Отождествление производится сначала для сопровождаемых траекторий, затем для обнаруживаемых.

В ходе отождествления выполняются следующие действия:

1. Экстраполяция каждой траектории – прогнозирование вектора состояния траектории на момент текущего обзора.
2. Стробирование – проверка возможности принадлежности каждой отметки одной из анализируемых траекторий.
3. При необходимости – точное отождествление.

Экстраполированная оценка вектора состояния $\mathbf{x}_{k|k-1}$ и его ковариация $\mathbf{P}_{k|k-1}$ для каждой траектории вычисляются на основе предыдущей оценки вектора состояния $\mathbf{x}_{k-1}$ и его ковариации $\mathbf{P}_{k-1}$:

$$\mathbf{x}_{k|k-1} = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_{k-1};$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = (\mathbf{F}_k \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{G} \sigma^2 \mathbf{G}^T) / \alpha_w,$$

где $\alpha_w = (N_w - 1) / N_w$ – коэффициент экспоненциального забывания, которое вводится для повышения качества учета детерминированных изменений первой и второй производных по координатам посредством ограничения эффективной длины последовательности векторов измерений, на основе которой вычисляется фильтрованная оценка; N_w – эффективная длина скользящего окна.

Стробирование выполняется в полярных координатах в m -мерном пространстве, где m – размер вектора измерений $\mathbf{z}$ ($m = 3$), для каждой пары i -я отметка / j -я траектория. При этом для данной пары вычисляется статистическое расстояние (расстояние Махаланобиса)

$\rho_{ij} = \mathbf{v}_{ij}^T \mathbf{S}_{ij}^{-1} \mathbf{v}_{ij}$ (где $\mathbf{v}_{ij} = \mathbf{z}_{jk} - \mathbf{H} \mathbf{x}_{i|k-1}$ – вектор

невязки; $\mathbf{S}_{ij} = \mathbf{P}_{i|k-1} + \mathbf{R}_j$ – его ковариационная матрица) и сравнивается с порогом стробирования $\gamma = \chi_m^2(P_G)$, где P_G – заданная вероятность стробирования. При $\rho_{ij} \leq \gamma$ принимается решение о том, что i -я отметка может принадлежать j -й траектории. Результат стробирования – матрица стробирования $\mathbf{A} [a_{ij} = \text{bool}(\rho_{ij} \leq \gamma)]$ и матрица стоимости $\mathbf{C} [c_{ij} = \rho_{ij}]$.

Если оказывается, что в каждой линии матрицы стробирования присутствует не более одной единицы, т. е. каждой отметке поставлено в соответствие не более одной траектории и наоборот, операция стробирования считается завершённой. В противном случае возникает необходимость проведения точного отождествления. В ходе точного отождествления необходимо на основе матриц $\mathbf{A}$ и $\mathbf{C}$ сформировать оптимальное в некотором смысле решение, при котором скорректированная матрица стробирования удовлетворяла бы условию "не более одной единицы в линии". В основе работы алгоритма точного отождествления лежит метод глобального ближайшего соседа (ГБС) [14]. Суть метода заключается в минимизации суммарной стоимости выбранного варианта распределения отметок по траекториям. Решение задачи назначения отметок траекториям осуществляется при помощи алгоритма назначения Манкреса (он же венгерский), минимизирующего общую стоимость выбранной последовательности паросочетаний [15]. Достоинство алгоритма – высокая вычислительная эффективность, позволяющая реализовывать его в системах сопровождения реального времени. В описываемом случае метод Манкреса решает задачу ГБС, минимизируя суммарное расстояние между траекториями и стробированными отметками.

Алгоритм фильтрации вычисляет текущую оценку вектора состояния цели $\mathbf{x}_k$ и его ковариационной матрицы $\mathbf{P}_k$ на основе присвоенного траектории на данном обзоре измерения $\mathbf{z}_k$ с ковариационной матрицей $\mathbf{R}_k$. Для фильтрации параметров траектории используется алгоритм на основе фильтра Калмана (ФК) для модели СА. В системе функционируют параллельно 3

ФК, каждый из которых работает с одной координатой.

Инициализация ФК производится на основе измерений трех последовательных обзоров: на втором обзоре по двум измерениям вычисляется предварительная оценка первой производной, т. е. "скорости" изменения координаты (на примере дальности):

$$\dot{\rho}_2 = (\rho_2 - \rho_1) / \tau_2; \sigma_{\dot{\rho}_2}^2 = (\sigma_{\rho_2}^2 - \sigma_{\rho_1}^2) / \tau_2^2,$$

на третьем обзоре по двум оценкам первой производной вычисляется предварительная оценка второй производной ("ускорения" изменения координаты):

$$\ddot{\rho}_3 = (\dot{\rho}_3 - \dot{\rho}_2) / \tau_3; \sigma_{\ddot{\rho}_3}^2 = (\sigma_{\dot{\rho}_3}^2 - \sigma_{\dot{\rho}_2}^2) / \tau_3^2,$$

где $\tau_k = t_{k-1} - t_k$ – временной интервал между соседними измерениями (далее индекс у τ указываться не будет). Соответственно на первом обзоре существования траектории вектор состояния для координаты ρ имеет вид $\mathbf{z}_{\rho 1} = [\rho]$, на втором $\mathbf{z}_{\rho 2} = [\rho, \dot{\rho}]$, на третьем и последующих – $\mathbf{z}_{\rho k} = [\rho, \dot{\rho}, \ddot{\rho}]$.

Результирующая оценка вектора состояния и ее ковариация находятся так:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \mathbf{x}_{k|k-1} + \mathbf{K}(\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\mathbf{x}_{k|k-1}),$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{P}_{k|k-1}^{-1} + \mathbf{H}^T \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{H})^{-1},$$

где $\mathbf{K} = \mathbf{P}_k \mathbf{H}^T \mathbf{R}_k^{-1}$ – матричный коэффициент усиления фильтра Калмана.

В основе метода обнаружения траектории лежит алгоритм последовательных серийных испытаний, реализующий логику "2/L + M/N". Он состоит из трех этапов:

1) создания новой завязываемой траектории по отметке, не отождествленной ни с одной из имеющихся в системе траекторий;

2) завязки траектории и присвоения ей статуса подтверждаемой после получения ею второй отметки за L последующих обзоров;

3) подтверждения траектории и присвоения ей статуса сопровождаемой после получения ею не менее M отметок за N последующих обзоров.

Стробирование при завязке выполняется для каждой завязываемой траектории и каждой от-

метки, не отождествленной с сопровождаемыми и подтверждаемыми траекториями. Оно основано на том, что цель, имеющая определенную динамику, изменяет за время между обзорами свои параметры (дальность, азимут и радиальную скорость) в определенных пределах. Следует задать максимальные и минимальные значения скорости $v_{\max}, v_{\min}$, максимальную скорость поворота $\omega_{\max}$ и максимальное значение ускорения $a_{\max}$, вычислить для каждой пары отметка/траектория производные по дальности, азимуту и скорости и сравнить их с порогами. Дополнительно также можно сравнить знаки у полученной оценки производной по дальности и измеренных значений радиальной скорости у отметки и траектории – все 3 знака должны совпадать. Если некоторая отметка попала в стробы нескольких траекторий, следует выбрать одну из них для продолжения; при этом используется метод ближайшего соседа. Если в строб одной траектории попало m отметок, траектория продолжается по каждой из них, при этом создается m подтверждаемых траекторий с одинаковыми первыми отметками и разными вторыми. Тем самым гарантируется завязка истинной траектории при наличии в стробе истинной отметки. Задача отсеивания возникающих при этом ложных траекторий возлагается на алгоритм подтверждения.

Для подтверждаемых траекторий используется тот же самый набор алгоритмов отождествления и фильтрации, что и для сопровождаемых.

При пропуске обнаружения на некотором обзоре в качестве фильтрованной оценки траектории присваивается экстраполированная оценка. Сброс сопровождения траектории производится при наличии у нее серии из K пропусков обнаружений подряд.

Экспериментальные результаты. Получение экспериментальных данных. Записи сигнала радарного макета производились при следующих параметрах радара:

- включены оба передатчика ("узкий" и "широкий" луч);
- полоса зондирующего сигнала – 135 МГц;
- период повторения зондирующего сигнала – 30.32 мкс;
- количество накапливаемых импульсов – 256;
- размерность БПФ по дальности – 512;
- размерность БПФ по скорости – 256.

Условия проведения эксперимента были максимально приближены к реальным условиям.

возникающим при наблюдении за дорожной обстановкой, характерной для дворов жилых домов и улиц в центре города.

В качестве места наблюдения использовался внутренний двор СПбГЭТУ. Со всех сторон он окружен зданиями, у одного из которых расположена автомобильная стоянка. Во время проведения эксперимента в поперечном относительно нормали антенной решетки направлении перемещались пешеходы (студенты и сотрудники университета), которые усложняли наблюдаемую при помощи радара обстановку и максимально приближали ее к реально возникающей при нахождении автомобиля во дворе жилого дома.

Основным подвижным объектом в данном эксперименте был автомобиль, перемещающийся как в направлении "от" макета, так и в направлении "к" макету. Автомобиль двигался с небольшой скоростью, обеспечивающей, с одной стороны, безопасность пешеходов на территории университета, а с другой – усложняющей первичную обработку по выявлению автомобиля на фоне неподвижных объектов.

В качестве дополнительно усложняющих фо-

ноцелевую обстановку объектов можно выделить:

- 1) флажки с поднятыми флагами, создающие дополнительные неподвижные цели с доплеровским сдвигом;
- 2) деревья, частично экранирующие перемещающиеся цели, частично добавляющие дополнительные отметки;
- 3) перемещающиеся по территории автомобили, которые не только добавляют свои отметки, но и экранируют основной объект наблюдения.

Далее представлены результаты траекторного сопровождения для одного из экспериментов, в котором тестовый автомобиль двигался "змейкой" по направлению к РЛС с дальности около 60 м.

На рис. 9 представлены результаты измерений и сопровождения в координатах дальность / азимут. Черные точки – первичные измерения, линии разного цвета – построенные траектории подвижных объектов, находившихся в зоне видимости РЛС. Номер указан у начала траектории.

Траектория 114 – это тестовая цель, 535 – другая машина, траектории 25, 225, 729 и 763 принадлежат, по всей видимости, пешеходам. Пешеход, соответствующий 225-й траектории,

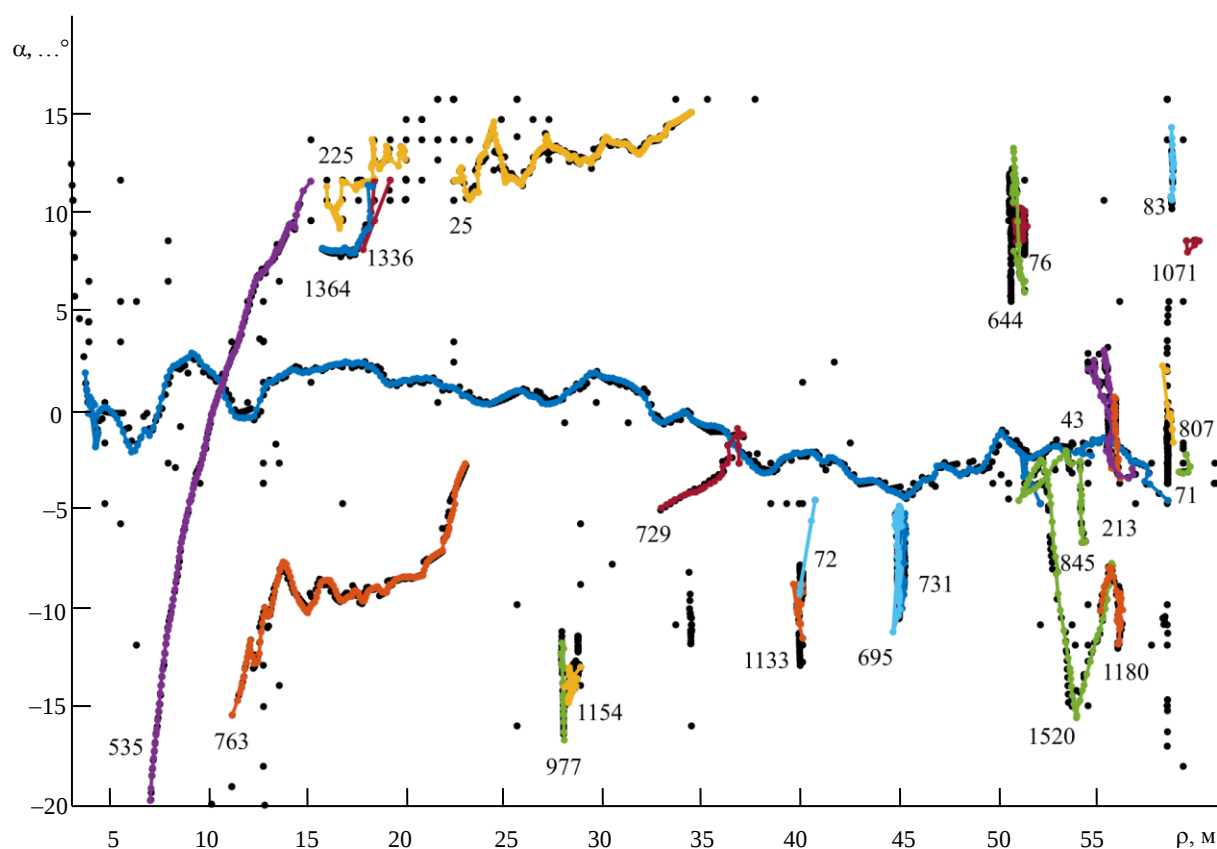


Рис. 9. Траектории, построенные вторичной обработкой после обработки тестовой записи

Fig. 9. Results of the test data trajectory processing

возможно, сел в 535-й автомобиль; пешеход, соответствующий 729-й траектории, проходил рядом с тестовым автомобилем. В данном эксперименте траектория автомобиля обнаружена на дальности около 56 м и сопровождается до дальности 4 м.

На рис. 10 представлены результаты сопровождения, выраженные в прямоугольных координатах.

Для траектории 114, соответствующей тестовой цели, построены графики зависимости скорости (рис. 11) и курса (рис. 12) от времени (время – в секундах от начала эксперимента).

На рис. 11 тонкой синей линией показан модуль скорости, вычисленный на основе оценок координат объекта в прямоугольной СК, он же – модуль вектора скорости автомобиля в прямоугольной СК, связанной с РЛС (красными штрихами – медианное значение, вычисленное по 100 отсчетам). Поскольку РЛС в данном эксперименте неподвижна, он соответствует абсолютной скорости автомобиля. На начальном этапе траектории дисперсия этой оценки довольно высока, в установившемся режиме сопровождения (после 8-й секунды) существенно ниже. Толстой черной линией показана оценка производной измеренной дальности, а так как автомобиль движется практически на РЛС, эта производная также соответствует абсолютной скорости автомобиля. На установившемся участке траектории наблюдается хорошее совпадение этих оценок.

На рис. 12 показан курс автомобиля, вычисленный на основе оценок координат объекта в прямоугольной СК, он же – курс автомобиля в СК, связанной с РЛС (штриховая линия – медианное значение, вычисленное по 100 отсчетам). Поскольку автомобиль двигался в направлении на РЛС, его курс в этой СК должен находиться около 180° (но не равняться этому значению, поскольку автомобиль двигался "змейкой").

Как видно из графиков, оцененные параметры траектории тестовой цели совпадают с реальными.

Заключение и перспективы. Эксперименты с использованием макета автомобильного радара диапазона 77 ГГц показывают, что при применении разработанных алгоритмов вторичной обработки сигнала достигаются приемлемые характеристики обнаружения и сопровождения целей в стандартной дорожной обстановке.

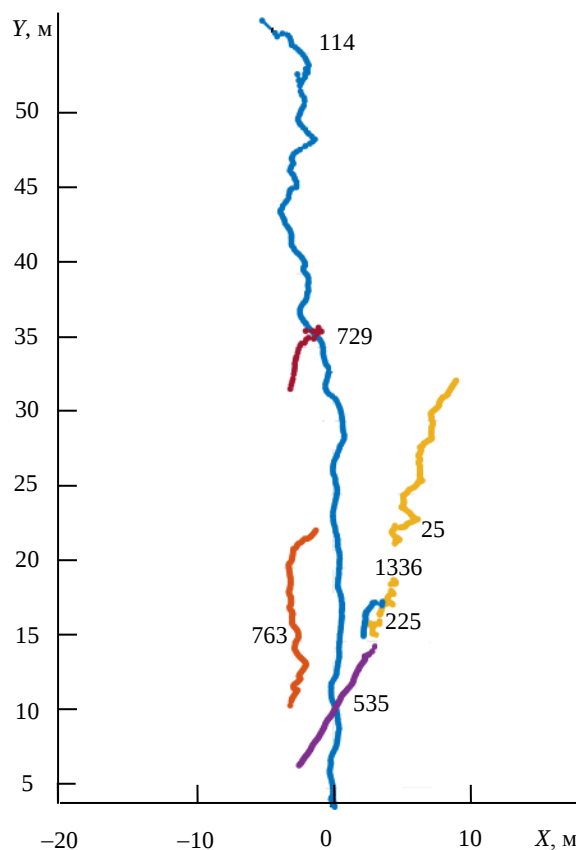


Рис. 10. Результат сопровождения в прямоугольных координатах (оставлены наиболее характерные траектории)

Fig. 10. Targets tracking in Cartesian coordinates (the most specific trajectories are presented)

Оцененные с помощью алгоритма траекторной обработки параметры траектории тестовой цели совпадают с реальными. Вместе с тем выявлен ряд недостатков тестируемого макета автомобильного радара.

Так, полоса заграждения ФВЧ слишком велика, что приводит как к увеличению минимальной дальности обнаружения, так и к увеличению дисперсии оценки минимальной скорости при траекторном сопровождении. Мощные помеховые сигналы в ближней зоне создают достаточно большое количество ложных отметок. Очевидно, необходимо усовершенствование алгоритмов первичной обработки.

Результаты измерений показывают высокий энергетический потенциал испытываемого макета. Даже при сравнительно простой антенне и СВЧ-тракте наблюдается уверенное сопровождение автомобиля на дальности более 50 м.

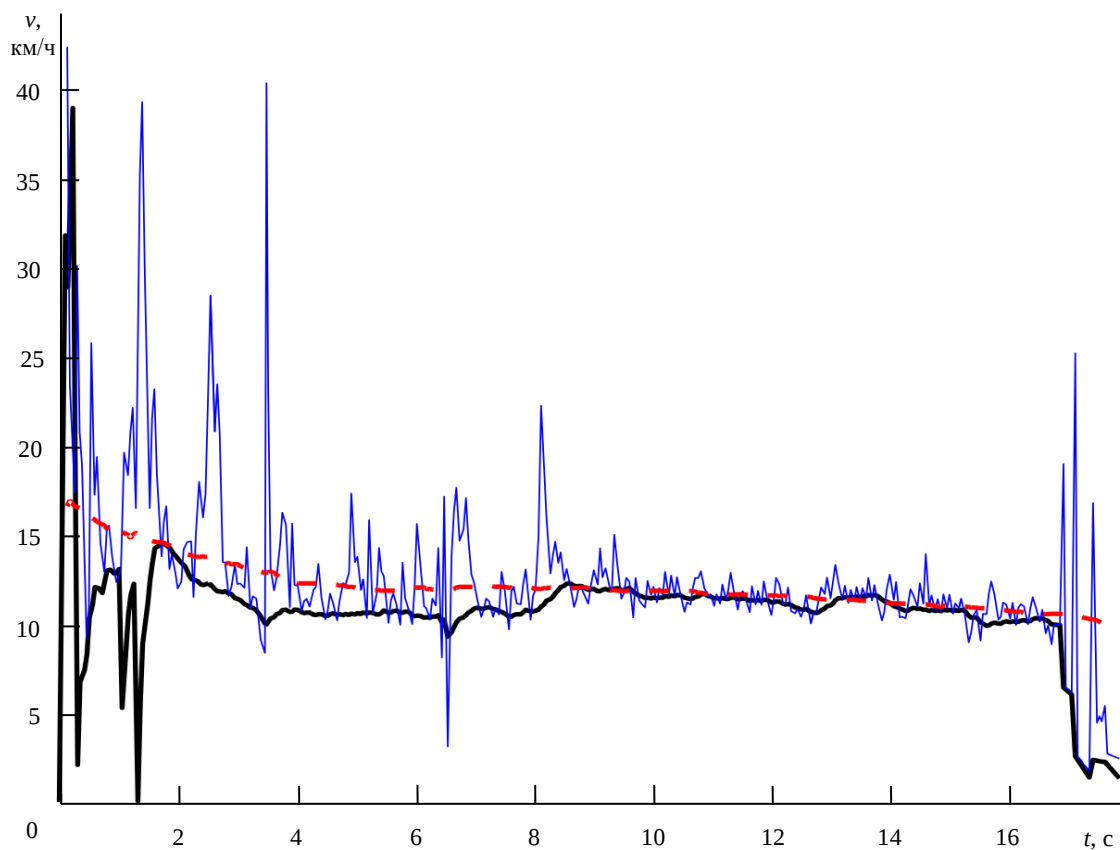


Рис. 11. Оценка скорости тестового автомобиля

Fig. 11. Velocity of the test vehicle estimation

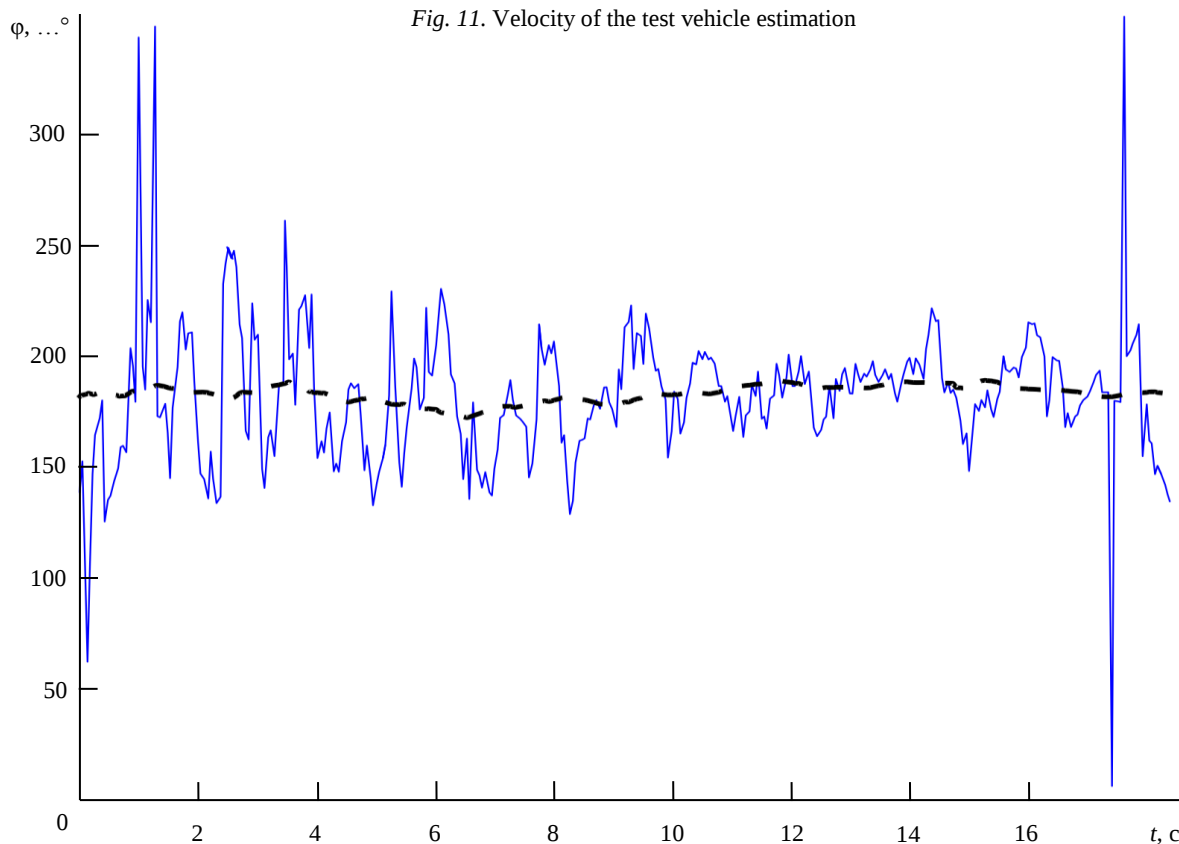


Рис. 12. Оценка курса тестового автомобиля

Fig. 12. Estimation of the moving direction of the test vehicle

Гибкость настроек и удобство программной оболочки позволяют отрабатывать алгоритмы вторичной обработки (а при покупке платы Data Collection Kit – и первичной) без необходимости разработки дорогостоящих прецизионных СВЧ-плат миллиметрового диапазона. В случае реализации собственной первичной обработки нейтрализуются практически все отмеченные ранее недостатки обработки от производителя. Един-

ственным непреодолимым минусом остается низкое качество документации, поставляемой вместе с платами, существенно увеличивающее время, требуемое для освоения макета.

Дальнейшая разработка алгоритмов вторичной обработки заключается в их адаптации к маневрам носителя, а также, при возможности, учете с этой целью показаний различных внешних датчиков.

Авторский вклад

Буренева Ольга Игоревна – проведение компьютерного моделирования.

Горбунов Игорь Геннадьевич – подготовка и оформление текста статьи.

Комаров Глеб Владимирович – подготовка и проведение эксперимента, предварительная обработка записей первичной радиолокационной информации.

Коновалов Александр Анатольевич – подготовка модели вторичной обработки радиолокационной информации, проведение компьютерного моделирования.

Куприянов Михаил Степанович – постановка задачи, общее руководство и обеспечение возможности проведения эксперимента, участие в обсуждении результатов.

Шичкина Юлия Александровна – помощь в выделении вычислительных мощностей, обсуждение результатов.

Author's contribution

Olga I. Bureneva, computer simulation.

Igor G. Gorbunov, preparation of the paper text.

Gleb V. Komarov, carrying out of experiment, prepare data for computer simulation.

Aleksandr A. Kononov, create model of secondary processing of radar information, computer simulation.

Mikhail S. Kupriyanov, statement of the problem, management of the work, assistance in organizing the experiment and discussion of the results.

Yulia A. Shichkina, assistance in allocating server for computer simulation and discussion of the results.

Список литературы

1. Automotive RADAR / H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, C. Singer // Handbook of Driver Assistance Systems. Basic Information, Components and Systems for Active Safety and Comfort. Springer, 2016. P. 325–430.

2. Белецкий Ю. С. Методы и алгоритмы контрастного обнаружения сигналов на фоне помех с априори неизвестными характеристиками. М.: Радиотехника, 2011. 436 с.

3. Richards M. A. Fundamentals of radar signal processing. Georgia Institute of Technology. New York: McGraw Hill, 2005. 539 p.

4. Schiementz M. Postprocessing Architecture for an Automotive Radar Network. Gettlingen: Cuvillier Verlag, 2005. 192 p.

5. Eltrass A., Khalil M. Automotive radar system for multiple-vehicle detection and tracking in urban environments // IET Intelligent Transport System. 2018. Vol. 12, iss. 8. P. 783–792. doi: 10.1049/iet-its.2017.0370

6. Tracking vehicles using radar detections / J. Gunnarsson, L. Svensson, L. Danielsson, F. Bengtsson

// Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symp., Istanbul, Turkey, 13–15 June 2007. P. 296–302. doi: 10.1109/IVS.2007.4290130

7. A New Vehicle Motion Model for Improved Predictions and Situation Assessment / J. Sorstedt, L. Svensson, F. Sandblom, L. Hammarstrand // IEEE Trans. on Intelligent Transport. Syst. 2011. Vol. 12, iss. 4. P. 1209–1219. doi: 10.1109/TITS.2011.2160342

8. Кузьмин С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев: КВИЦ, 2000. 428 с.

9. Dickmanns E. D., Zapp A. A Curvature-based Scheme for Improving Road Vehicle Guidance by Computer Vision // Proc. SPIE 0727, Mobile Robots I, 25 Feb. 1987. P. 161–168. doi: 10.1117/12.937795

10. Schubert R., Richter E., Wanielik G. Comparison and evaluation of advanced motion models for vehicle tracking // IEEE 11th Intern. Conf. on Information Fusion, Cologne, Germany, 2008. P. 1–6. doi: 10.1109/ICIF.2008.4632283

11. Mörbе M. Vehicle Dynamics Sensors for DAS // Handbook of Driver Assistance Systems. Basic Infor-

mation, Components and Systems for Active Safety and Comfort. Springer, 2016. P. 279–302.

12. Techmer A. Real time motion analysis for monitoring the rear and lateral road // IEEE Intelligent Vehicles Symp. Parma, Italy, 14–17 June 2004. P. 704–709. doi: 10.1109/IVS.2004.1336470

13. Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Ч. 1. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. 164 с.

14. Konstantinova P., Udarev A., Semerdjiev T. A study of a target tracking algorithm using global nearest neighbor approach // Proc. of the 4th Intern. Conf. on Computer Systems and Technologies, CompSys-Tech'2003. 2003. P. 1–6. doi: 10.1145/973620.973668

15. Pilgrim R. A. Munkres' Assignment Algorithm Modified for Rectangular Matrices. URL: <https://csclab.murraystate.edu/~bob.pilgrim/445/munkres.html> (дата обращения 27.04.2021)

Информация об авторах

Буренева Ольга Игоревна – кандидат технических наук, доцент кафедры ВТ СПбГЭТУ. Автор 96 печатных работ. Сфера научных интересов – разработка цифровых систем на базе ПЛИС, в том числе локальных систем контроля и управления, бит-поточковых вычислительных устройств, узлов для нейроморфных вычислений. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: OIBur@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6169-454X>

Горбунов Игорь Геннадьевич – научный сотрудник НИИ "Прогноз". Автор 31 публикации. Сфера научных интересов – комплексные вопросы построения радиолокационных систем, радиолокационные методы мониторинга морской поверхности. Адрес: НИИ "Прогноз", ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: gor-ig@mail.ru

Комаров Глеб Владимирович – аспирант кафедры РС СПбГЭТУ. Автор четырех научных статей. Сфера научных интересов – антенные системы, электродинамическое моделирование, распространение радиоволн. Адрес: НИИ "Прогноз", ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: komarov_gleb@list.ru

Коновалов Александр Анатольевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ "Прогноз". Автор 52 публикаций, в том числе пяти монографий и двух учебных пособий. Сфера научных интересов – вторичная и третичная обработка радиолокационной информации, объединение данных, многопозиционная радиолокация, бистатистические радиотехнические системы. Адрес: НИИ "Прогноз", ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: al_an_kon@mail.ru

Куприянов Михаил Степанович – доктор технических наук, профессор, руководитель научного и образовательного направлений Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор пяти монографий, 45 статей и тезисов докладов. Сфера научных интересов – программное обеспечение информационных систем реального времени (архитектурно зависимое программирование); методы и распределенные системы интеллектуального анализа данных и извлечения знаний; теория и методы исследования самовосстанавливающихся информационных систем; программное обеспечение встроенных систем; алгоритмы и параллельные системы цифровой обработки сигналов. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: mikhael.kupriyanov@gmail.com

Шичкина Юлия Александровна, доктор технических наук, руководитель отдела "Технологии сильного искусственного интеллекта в физиологии и медицине" в составе международного инновационного института искусственного интеллекта, кибербезопасности и коммуникаций им. А. С. Попова Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ". Автор двух монографий, 42 статей и тезисов докладов. Сфера научных интересов – математическое моделирование, параллельные вычисления на системах MPP и SMP; оптимизация доступа к базам данных; применение методов ИИ в прикладных задачах. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: strange.y@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-7140-1686>

References

1. Winner H. Automotive RADAR. Handbook of Driver Assistance Systems. Basic Information, Components and Systems for Active Safety and Comfort. Springer, 2016, pp. 325–430.
2. Beletsky Y. S. Methods and algorithms for contrast detection of signals against the interference background with a priori unknown characteristics. M., *Radio-technika*, 2011. (In Russ.)
3. Richards M. A. Fundamentals of radar signal processing. New York, McGraw Hill, 2005.
4. Schiemmentz M. Postprocessing Architecture for an Automotive Radar Network. Gettingen, Cuvillier Verlag, 2005.
5. Eltrass A., Khalil M. Automotive radar system for multiple-vehicle detection and tracking in urban environments. IET Intelligent Transport System. 2018, no. 8, pp. 783–792. doi: 10.1049/iet-its.2017.0370
6. Gunnarsson J., Svensson L., Danielsson L., Bengtsson F. Tracking vehicles using radar detections. Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symp., Istanbul, Turkey, June 13–15, 2007, pp. 296–302. doi: 10.1109/IVS.2007.4290130
7. Sörstedt J., Svensson L., Sandblom F., Hammarstrand L. A New Vehicle Motion Model for Improved Predictions and Situation Assessment. IEEE Trans. on Intelligent Transport. Syst. 2011, no. 4, pp. 1209–1219. doi: 10.1109/TITS.2011.2160342
8. Kuzmin S. Z. Digital radar. Introduction to theory Kiev, KVIC. 2000, 428 p. (in Russ.)
9. Dickmanns E. D., Zapp A. A Curvature-based Scheme for Improving Road Vehicle Guidance by Computer Vision. Proc. SPIE 0727, Mobile Robots I. 25 Feb. 1987, pp. 161–168. doi: 10.1117/12.937795
10. Schubert R., Richter E., Wanielik G. Comparison and evaluation of advanced motion models for vehicle tracking. IEEE 11th Intern. Conf. on Information Fusion. Cologne, Germany, 2008, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICIF.2008.4632283
11. Morbe M. Vehicle Dynamics Sensors for DAS. Handbook of Driver Assistance Systems. Basic Information, Components and Systems for Active Safety and Comfort. Springer, 2016, pp. 279–302.
12. Techmer A. Real time motion analysis for monitoring the rear and lateral road. IEEE Intelligent Vehicles Symp. Parma, Italy, 14–17 June 2004, pp. 704–709. doi: 10.1109/IVS.2004.1336470
13. Konovalov A. A. *Osnovy traektornoy obrabotki radiolokatsyonnoy informatsii* [Basic of the Radar Target Tracking]. Part I. SPb, LETI Publishers, 2013. (In Russ.)
14. Konstantinova P., Udarev A., Semerdjiev T. A study of a target tracking algorithm using global nearest neighbor approach. Intern. Conf. on Computer Systems and Technologies, CompSysTech'2003. 2003, pp. 1–6. doi: 10.1145/973620.973668
15. Pilgrim R. A. Munkres' Assignment Algorithm Modified for Rectangular Matrices. Available at: <https://csclab.murraystate.edu/~bob.pilgrim/445/munkres.html> (accessed 27.04.2021)

Information about the authors

Olga I. Bureneva, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor in Computer Science from the Saint Petersburg Electrotechnical University (2005). The Author of 96 printed works. Area of expertise: FPGA-based digital systems, including local control and management systems, bitstream computing devices, and units for neuromorphic computing.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: OIBur@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-6169-454X>

Igor G. Gorbunov, Research Fellow Research Institute "Prognov". The Author of 31 scientific publications. Area of expertise: complex issues of building radar systems, radar methods for monitoring the sea surface.

Address: Research Institute "Prognov", 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: gor-ig@mail.ru

Gleb V. Komarov, post-graduate student of the Department of radio system Saint Petersburg Electrotechnical University. The Author of 4 scientific articles. Area of expertise: antenna systems, electrodynamic modeling, radio wave propagation.

Address: Research Institute "Prognov", 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: komarov_gleb@list.ru

Aleksandr A. Konovalov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Research Institute "Prognoz" St. Petersburg State Electrotechnical University. The Author of 52 scientific publications, including 5 monographs and 2 textbooks. Area of expertise: secondary and tertiary processing of radar information, data fusion, multi-position radar, bistatic radio systems.

Address: Research Institute "Prognoz", 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: al_an_kon@mail.ru

Mikhail S. Kupriyanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Scientific and Educational Directions of the St. Petersburg State Electrotechnical University. The Author of 5 monographs, 45 scientific articles and abstracts. Area of expertise: software for real-time information systems (architecture-dependent programming); methods and distributed systems for data mining and knowledge extraction; theory and research methods for self-healing information systems; embedded systems software; algorithms and parallel systems for digital signal processing.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: mikhail.kupriyanov@gmail.com

Yulia A. Shichkina, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department "Technologies of Artificial Intelligence in Physiology and Medicine" as part of the International Innovative Institute of Artificial Intelligence, Cybersecurity and Communications named after V. I. A. S. Popov of the St. Petersburg State Electrotechnical University. The Author of 2 monographs, 42 scientific articles and abstracts. Area of expertise: mathematical modeling, parallel computing on MPP and SMP systems; optimization of access to databases; application of AI methods in applied problems.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: strange.y@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0001-7140-1686>

Проектирование и технология радиоэлектронных средств

УДК 621.396.96

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-39-48>

Особенности конструкции антенных решеток автомобильных радаров, построенных на основе передающих и приемных многоэлементных модулей

А. А. Кузин, А. В. Мякинков, С. А. Шабалин✉

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

✉shabalin.semyon@yandex.ru

Аннотация

Введение. В современных автомобилях в качестве основных сенсоров систем помощи водителю, обнаруживающих объекты при любых погодных условиях, применяют радары. Одним из самых распространенных типов антенн является антенная решетка (АР). Коэффициент взаимной связи между соседними каналами АР оказывает значительное влияние на формируемую диаграмму направленности (ДН). Данный аспект важно учитывать для достижения заданных значений коэффициента усиления и уровня боковых лепестков (УБЛ) ДН. В статье проанализировано влияние предлагаемых конструктивных решений на основные параметры спроектированной АР автомобильного радара, в частности на уровень коэффициента взаимной связи между каналами, УБЛ ДН.

Цель работы. Реализация оптимального подхода к построению топологии АР с точки зрения уменьшения уровня взаимного влияния соседних каналов решетки и получения ДН антенны с заданными характеристиками.

Методы и материалы. Для достижения требуемых параметров разработанной топологии АР методом конечных элементов (finite element method – FEM) рассчитаны и спроектированы копланарные и микрополосковые линии и модели экранов.

Результаты. Проведено электродинамическое моделирование АР миллиметрового диапазона. Показано влияние на ДН АР копланарных линий передачи. Исследованы особенности применения экранирующих элементов в структуре АР. В результате сравнительного анализа материалов определены параметры подложки для достижения лучшего уровня развязки между соседними каналами антенны.

Заключение. Применение копланарных линий передачи позволяет значительно уменьшить УБЛ ДН в угломестной плоскости. В случае использования делителей мощности при формировании модулей АР (подрешеток) вместо копланарных линий целесообразно использование микрополосковых конструкций, закрытых специальными экранирующими поверхностями. В этом случае возможно формирование заданного амплитудно-фазового распределения по апертуре.

Ключевые слова: антенная решетка, копланарная линия, экранирование, взаимная развязка каналов, диаграмма направленности, микрополосковая линия

Для цитирования: Кузин А. А., Мякинков А. В., Шабалин С. А. Особенности конструкции антенных решеток автомобильных радаров, построенных на основе передающих и приемных многоэлементных модулей // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 3. С. 39–48. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-39-48

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-11-2019-053 от 20 ноября 2019 года (Постановление Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218), проект "Создание отечественного высокотехнологичного производства систем безопасности автотранспорта на основе блока управления и интеллектуальных датчиков, включающих миллиметровые радары диапазона 76...77 ГГц".

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 30.03.2021; принята к публикации после рецензирования 25.04.2021; опубликована онлайн 29.06.2021



Design Features of Antenna Arrays of Automotive Radars Based on Transmitting and Receiving Multi-Element Modules

Andrey A. Kuzin, Aleksandr V. Miakinkov, Semen A. Shabalin✉

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

✉ shabalin.semyon@yandex.ru

Abstract

Introduction. Modern vehicles are equipped with radars, which serve as the main sensors of driver assistance systems detecting objects in all weather conditions. Antenna arrays (AA) are the most common type of radar antennas. The coefficient of mutual coupling between adjacent antenna channels has a significant effect on the formed radiation pattern (RP) of an AA. This aspect is important for achieving the required values of gain and side-lobe level (SLL). This article analyses the effect of the proposed design solutions on the main parameters of an automotive radar AA, in particular, on the mutual coupling coefficient between the channels and the SLL of the DP.

Aim. To develop an optimal approach to constructing an AA topology in terms of reducing the level of mutual influence of adjacent array channels and obtaining a DP with specified characteristics.

Materials and methods. To achieve the required parameters of the designed AA topology, the coplanar and microstrip lines were calculated using the finite element method and shield models.

Results. An electrodynamic modeling of a millimetre-wave AA was carried out. The effect of coplanar transmission lines on the RP was shown. The features of applying shielding elements in the AA structure were investigated. Antenna patterns were obtained for both an AA designed based on coplanar transmission lines and that based on the use of shields. The conducted comparative analysis determined the parameters of the substrate optimal for achieving a better level of decoupling between adjacent antenna channels. The values of AA RP obtained during modeling were presented.

Conclusion. The use of coplanar transmission lines can significantly reduce the SLL of the DP in the elevation plane. When implementing the module structure of an array (using of sub-arrays), the power dividers are realized. In this case, instead of coplanar lines, it is advisable to use specific microstrip constructions covered with shielding surfaces. In this case, the formation of a given amplitude-phase distribution over aperture is possible. A comparative analysis of the AA topologies with different substrates was carried out with the purpose of achieving improved decoupling. The obtained values of the coefficient of mutual influence of adjacent array channels correspond to those of modern AA of automotive radars. The methods of reducing the parasitic radiation of transmission lines were considered. The AA RP obtained via electrodynamic modeling were presented. The use of a thin substrate with a higher dielectric constant makes it possible to improve the AA characteristics.

Keywords: antenna array, coplanar line, shielding, mutual decoupling of channels, radiation pattern, microstrip line

For citation: Kuzin A. A., Miakinkov A. V., Shabalin S. A. Design Features of Antenna Arrays of Automotive Radars Based on Transmitting and Receiving Multi-Element Modules. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 3, pp. 39–48. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-39-48

Acknowledgements: The paper was prepared in the Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev and supported by the Agreement No. 075-11-2019-053 dated 20.11.2019 (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in accordance with the Decree of the Government of the Russian Federation of April 9, 2010 No. 218), project "Creation of a domestic high-tech production of vehicle security systems based on a control mechanism and intelligent sensors, including millimetre radars in the 76...77 GHz range".

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

Submitted 30.03.2021; accepted 25.04.2021; published online 29.06.2021

Введение. В последние годы все более популярной и широко используемой становится разработка и реализация систем помощи водителю (ADAS). Такие системы контролируют слепые зоны, движение по полосам, скоростной режим, что делает процесс управления автомобилем более безопасным. В настоящее время в качестве основных сенсоров систем помощи водителю используются радары. Это объясняется тем, что их характеристики в наименьшей степени зависят от погодных условий и времени суток. Одним из основных узлов, во многом определяющих характеристики автомобильных радаров, является антенная система, которая, как правило, реализуется в виде фазированной антенной решетки (АР).

Для увеличения дальности обнаружения объектов необходимо повышать коэффициент усиления, который определяется в конечном итоге площадью суммарной апертуры передающей и приемной частей решетки и коэффициентом "заполнения" апертуры элементами решетки [1]. Одновременно с увеличением суммарной апертуры АР (передающей и приемной) повышается разрешающая способность по угловой координате. Вместе с тем важным требованием, определяющим конкурентоспособность радара, является его цена, которая растет практически пропорционально числу передающих и приемных каналов.

Известны два способа уменьшения числа физических каналов приема и передачи при сохранении суммарной апертуры. Один из них связан с использованием популярной в настоящее время технологии МИМО (multiple input – multiple output) [2–4]. Такой подход предполагает использование разреженной АР передатчика или приемника, в которой расстояние между соседними элементами превышает половину длины волны в 2 и более раза. При этом в диаграмме направленности (ДН) разреженной решетки возникают интерференционные максимумы. В результирующей ДН приемно-передающей антенны эти максимумы устраняются за счет излучения и последующей совместной обработки ортогональных сигналов, количество которых должно соответствовать отношению расстояния между элементами разреженной решетки к половине длины волны. При этом на основе операции свертки структур передающей и приемной решеток реализуется формирование виртуальной решетки, для чего структура одной АР должна "заполнять" промежутки между элементами другой, так что результирующая виртуальная

решетка становится "заполненной". В итоге разрешающая способность МИМО-решетки по угловой координате определяется суммой двух расстояний: между крайними элементами передающей и приемной решеток. Коэффициент усиления при этом уменьшается по сравнению с антенной, апертура которой полностью заполнена элементами, расположенными на расстоянии в половину длины волны, пропорционально уменьшению коэффициента заполнения.

Другой подход связан с использованием подрешеток, представляющих собой многоэлементные модули. Такие модули могут состоять, например, из двух или более столбцов, объединенных по выходу или по входу сумматорами (делителями) мощности, реализованными на микрополосковых линиях [1, 5]. В этом случае удастся сохранить коэффициент усиления и разрешающую способность, и в то же время при работе в узком секторе углов в дальней зоне интерференционные максимумы ДН приемника подавляются при умножении на ДН передатчика [1, 5]. При этом, как показано в [1], максимизировать угловое разрешение можно за счет размещения части приемных подрешеток на краях апертуры.

В настоящей статье рассмотрена разработка конструкции АР диапазона 76...77 ГГц для автомобильного радара, построенной на основе передающих и приемных многоканальных модулей. Проанализированы конструктивные решения, делающие возможным минимизацию взаимного влияния каналов решетки друг на друга, чем обеспечивается наиболее точное соответствие ДН спроектированной АР результатам теоретического расчета для случая полностью развязанных приемных каналов. Указанный аспект важно учитывать для достижения значений коэффициента усиления и уровня боковых лепестков (УБЛ), близких к определяющимся количеством элементов решетки и выбранным весовым окном соответственно. Кроме того, для снижения УБЛ в вертикальной плоскости необходимо минимизировать переотражения сигналов в линиях, соединяющих столбцы АР с приемно-передающими модулями. В настоящей статье проанализировано влияние предложенных конструктивных решений на основные параметры спроектированной АР автомобильного радара – уровень развязки между каналами и УБЛ ДН в обеих плоскостях.

Методы исследования. Топология АР построена по результатам теоретического анализа, выполненного на основе теории обнаружения и разрешения сигналов, а также теории пространственно-временной обработки сигналов в АР. Результаты этих расчетов описаны в [1].

Электромагнитное моделирование выполнено в пакете САПР ADS (Advanced Design System) методом конечных элементов [6] с использованием постобработки результатов моделирования.

Результаты исследований. В качестве типа элемента АР выбрана структура, получившая в литературе название "патч" [7] – прямоугольный печатный элемент. Теоретическая и экспериментальная оценка и компенсация фазовых набегов в направляющих структурах СВЧ-модулей позволяет формировать соответствующую ДН в азимутальной плоскости [1, 8]. Требования к ДН в угломестной плоскости заключаются в обеспечении низкого УБЛ для уменьшения уровня помех от переотражений от поверхности земли. В качестве весовой функции в столбцах проектируемой АР применяется амплитудное распределение Чебышева. Процесс проектирования столбца решетки с заданным распределением состоит в изменении размеров патчей и линий, соединяющих их друг с другом [9–11].

На рис. 1 показана топология одного столбца проектируемой АР. Приведенная структура запитывается со стороны крайнего элемента, а соседние элементы столбца (излучатели) 1 соединяются микрополосковыми линиями 2. Длина и ширина

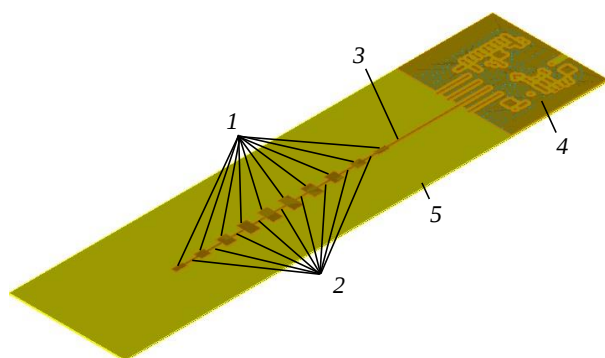


Рис. 1. Топология столбца АР с направляющей структурой, соединяющей его с приемо-передающим модулем: 1 – элементы АР; 2 – микрополосковые линии; 3 – направляющая структура; 4 – микросхема приемо-передающего модуля; 5 – подложка

Fig. 1. Topology of the column of an antenna array with a guiding structure connecting it to a transceiver:

- 1 – antenna array elements; 2 – microstrip lines;
- 3 – guide structure; 4 – the chip of the transceiver module;
- 5 – substrate

излучателей и соединительных линий подбираются из условий согласования и заданного амплитудного распределения [9]. Также на рис. 1 схематично показана направляющая структура 3, соединяющая столбец АР с микросхемой передающего (приемного) интегрального модуля 4.

Важным аспектом является способ построения направляющей структуры. Она может быть выполнена по технологии микрополосковых линий передачи, аналогично линиям связи между элементами антенны. В этом случае направляющая структура соединяет столбец АР с копланарной линией, которая в свою очередь соединена с микросхемой интегрального модуля 4. Согласование импедансов элементов антенны и контакта микросхемы позволяет получить высокий уровень направленности структуры. Однако при распространении волны от источника возникают паразитные излучения линии передачи в плоскости, проходящей через направляющую структуру 3 и перпендикулярную подложке 5 (рис. 1). Эти излучения приводят к изменению заданного амплитудно-фазового распределения, как следствие, к искажению формы ДН антенны. В частности, происходит увеличение УБЛ ДН в близких к 90° направлениях, основной лепесток ДН становится не ортогональным плоскости антенны и искажается форма луча. Указанный эффект проиллюстрирован на рис. 2, где кривой 1 показан результат теоретического расчета ДН при реализации амплитудного распределения Чебышева, а кривой 2 – результат моделирования ДН получившейся конструкции в САПР.

Значительно меньшими, по сравнению с микрополосковыми линиями, потерями на излучение обладают копланарные линии. Благодаря их кон-

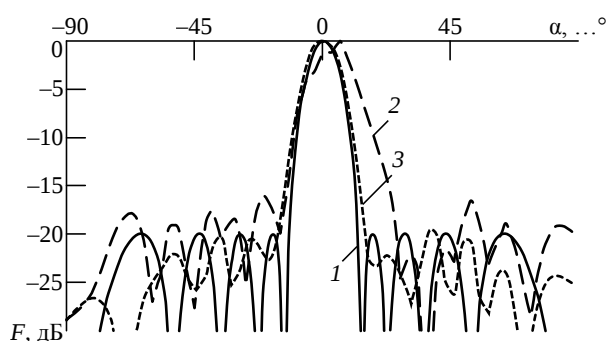


Рис. 2. Нормированная ДН столбца АР: 1 – теоретическая с распределением Чебышева; 2 – смоделированная; 3 – при использовании копланарных линий

Fig. 2. Normalized RP of one column:

- 1 – theoretical with Chebyshev distribution; 2 – simulated;
- 3 – obtained using of coplanar lines

струкции поле практически полностью концентрируется в подложке и уровень паразитного излучения значительно снижается. При использовании для передачи сигнала от передающего модуля в антенну копланарной линии параметры ДН значительно улучшаются – УБЛ соответствует заданному амплитудному распределению, а максимум ДН формируется строго в направлении нормали к плоскости антенны (рис. 2, 3).

Если конструктивными элементами антенны являются одиночные столбцы, использование копланарных линий практически решает проблему потерь, связанных с паразитным излучением линий передачи, и, следовательно, искажений ДН. Однако при использовании подрешеток, состоящих из нескольких столбцов, появляется необходимость построения делителей мощности [12]. Причем при количестве столбцов в структуре, большем двух, конструкции делителей могут иметь более одного яруса (рис. 3). Необходимость большого количества делителей существенно усложняет согласование элементов решетки с приемо-передающей микросхемой при проектировании копланарной линии передачи. Кроме того, участки линии с делителями мощности так же, как

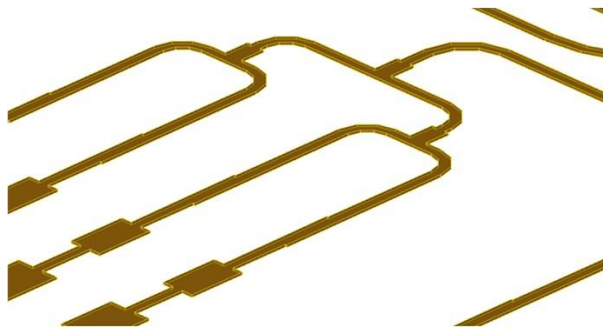


Рис. 3. Структура делителей мощности

Fig. 3. Structure of the power divider

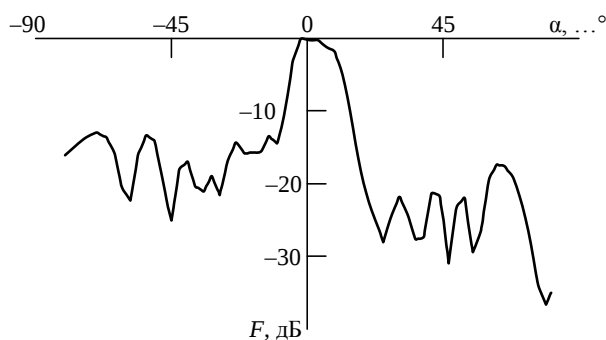


Рис. 4. Нормированная ДН в угломестной плоскости подрешетки AP, состоящей из 4 столбцов

Fig. 4. Normalized RP in the elevation plane of an antenna subarray consisting of 4 columns

и микрополосковые линии, формируют паразитное излучение, что приводит к искажению ДН. На рис. 4 показана ДН в угломестной плоскости подрешетки, состоящей из четырех столбцов, объединенных микрополосковыми сумматорами. Видно, что по сравнению с ДН одиночного столбца имеет место искажение основного лепестка и значительное увеличение УБЛ.

Возможным способом уменьшения влияния паразитного излучения линий при наличии делителей мощности является применение экранов [13]. Экран представляет собой короб из материала с высокой проводимостью (меди, латуни), формирующий электрическую стенку для электромагнитного поля (рис. 5). Для достижения максимального эффекта экран закрывает все микросхемы и передающие линии со всеми делителями мощности вплоть до границ конструкции столбцов антенной решетки. Исключая паразитные излучения линий связи, экран обеспечивает снижение УБЛ ДН в вертикальной плоскости и повышение коэффициента усиления антенны [14, 15].

Учитывая тот факт, что микросхема расположена в одном слое с антенной, высота экрана обусловлена вертикальным размером используемой микросхемы. На рис. 6 представлено распределение модуля напряженности электрического поля подрешетки из 4 столбцов с делителем мощности (рис. 3) при отсутствии (а) и наличии (б) экрана 3. Область паразитного излучения 1 ведет к значительному искажению распределения поля в угломестной плоскости 2 (рис. 6, а). Экран 3 (рис. 6, б) с боковыми стенками 4 позволяет уменьшить уровень указанных искажений и достигнуть заданных характеристик ДН антенны (направленности, УБЛ).

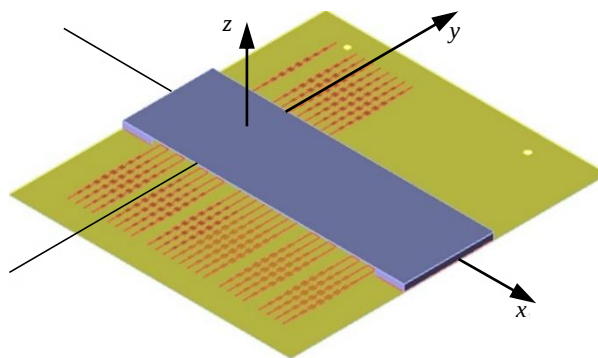


Рис. 5. Структура фазированной AP с экраном

Fig. 5. Design of a phased antenna array with a shield

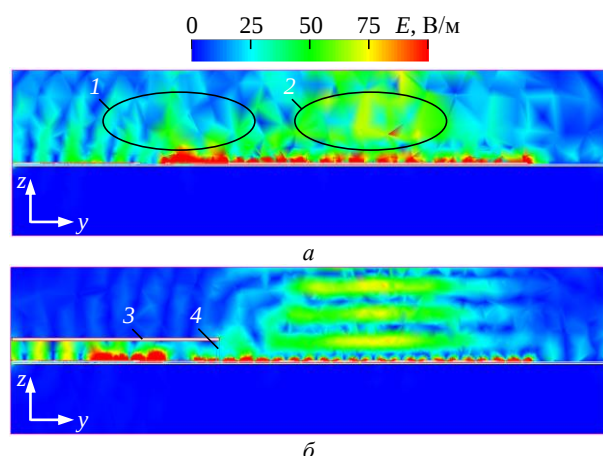


Рис. 6. Распределение напряженности электрического поля вдоль АР в угломестной плоскости: а – без экрана; б – с экраном

Fig. 6. Distribution of the electrical field intensity along the antenna in the elevation plane: а – without a shield; б – with a shield

На рис. 7 показаны ДН АР, полученные в результате моделирования в САПР конструкции без экрана (1) и с его использованием (2). Во втором случае паразитное излучение практически полностью сосредоточено в пределах экрана и не вносит искажений при формировании ДН с заданными характеристиками излучения. Из рисунка видно, что УБЛ ДН в угломестной плоскости при использовании экрана снижается примерно на 8 дБ.

Экран позволяет не только снизить уровень паразитного излучения, но и уменьшить влияние внешних помех на микросхемы, линии передачи и делители мощности.

Другим важным вопросом при проектировании АР является взаимное влияние соседних столбцов решетки друг на друга. В общем случае при наличии близкорасположенных излучающих элементов (передающих или приемных) происходит "просачивание" части сигнала, принятого или

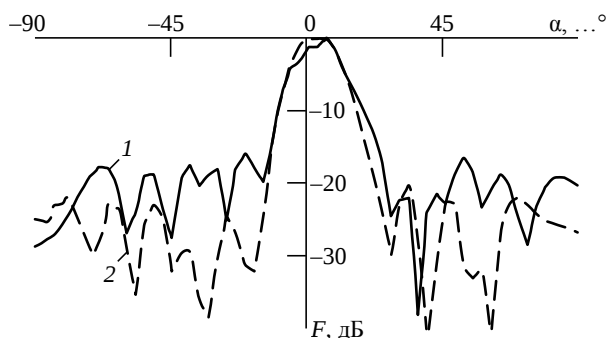


Рис. 7. Нормированная ДН АР в угломестной плоскости: 1 – без экрана; 2 – с экраном

Fig. 7. Normalized AA RP in the elevation plane: 1 – without a shield; 2 – with a shield

излученного элементом решетки (столбцом), в соседние элементы. В результате ДН элемента антенны формируется не только за счет распределения поля, определяемого структурой столбца, но и за счет паразитного взаимного влияния между ним и соседними столбцами АР [7].

В рассматриваемой антенне столбцы приемной решетки расположены друг от друга на расстоянии, равном половине длины волны. Ширина и длина каждого патча задаются амплитудным распределением Чебышева в угломестной плоскости. При выборе в качестве подложки материала Rogers 4003 ($\epsilon = 3.55$) расстояние между центральными (наиболее широкими) патчами соседних столбцов составило примерно 0.2...0.3 мм. В результате развязка между этими столбцами, определяемая амплитудой коэффициента передачи (параметр S_{21}), имеет значение около -15 дБ (кривая 1 на рис. 8). При этом значительно ухудшаются характеристики направленности структуры в азимутальной плоскости.

Кроме того, при наличии паразитного взаимного влияния между столбцами происходит рассогласование импедансов структуры и контакта микросхемы. Импеданс структуры при низком уровне развязки становится функцией взаимного расположения и напряженности поля соседних столбцов АР. На рис. 9 кривой 1 показана частотная зависимость коэффициента отражения от входа элемента АР (параметр S_{11}), состоящей из одиночного столбца, а кривой 2 – аналогичная зависимость для случая, когда рядом находится второй такой же столбец АР.

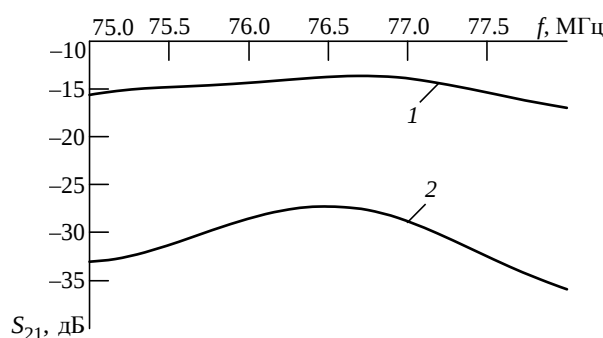


Рис. 8. Амплитуда коэффициента передачи между соседними столбцами АР при использовании в качестве подложки материала: 1 – Rogers 4003; 2 – Rogers 4350

Fig. 8. Amplitude of the transmission coefficient between adjacent columns of the antenna with a substrate made of: 1 – Rogers 4003; 2 – Rogers 4350

Одним из возможных путей решения указанной проблемы является использование в качестве подложки материала с большим значением диэлектрической проницаемости. Исходя из производственных возможностей российских предприятий в проекте, реализуемом авторами, использован материал Rogers 4350 ($\epsilon = 3.66$). При этом уменьшились длина волны в линии передачи и, как следствие, геометрические размеры каждого патча в столбцах решетки, а расстояние между центральными патчами соседних столбцов увеличилось. В результате уровень развязки между каналами антенной решетки повышается (рис. 8, кривая 2).

Согласование структуры с источником питания в этом случае уже слабо зависит от позиции и напряженности соседних столбцов, что продемонстрировано на рис. 9 (кривая 3).

На рис. 10 представлено распределение напряженности электрического поля при использовании в качестве подложки материалов Rogers 4003 (а) и Rogers 4350 (б). Видно, что при использовании подложки Rogers 4003 в области центральных патчей возникает сильная электромагнитная связь между соседними столбцами антенны, которая практически отсутствует при подложке из материала Rogers 4350.

При меньшей толщине подложки (0.101 мм для Rogers 4350 и 0.203 мм для Rogers 4003) поле в большей степени концентрируется между проводником и слоем, подключенным к общему потенциалу, что снижает потери на излучение при распространении волны вдоль линии передачи. Однако тангенс угла потерь материала Rogers 4350 значительно выше, чем у Rogers 4003, что в свою очередь ведет к большим потерям в диэлектрике и,

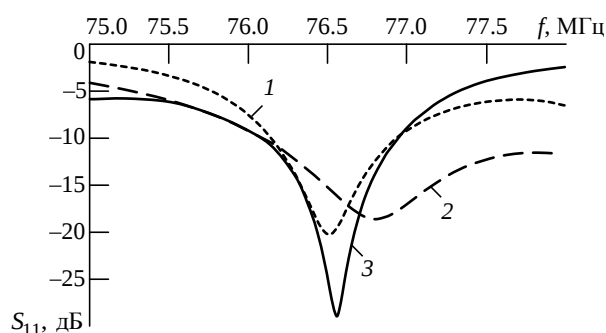


Рис. 9. Характеристика согласования столбца с источником питания: 1 – одиночного столбца; 2 – при наличии соседнего столбца; 3 – при использовании материала Rogers 4350

Fig. 9. Matching characteristic of the column to the source: 1 – single column; 2 – with the presence of an adjacent column; 3 – using Rogers 4350

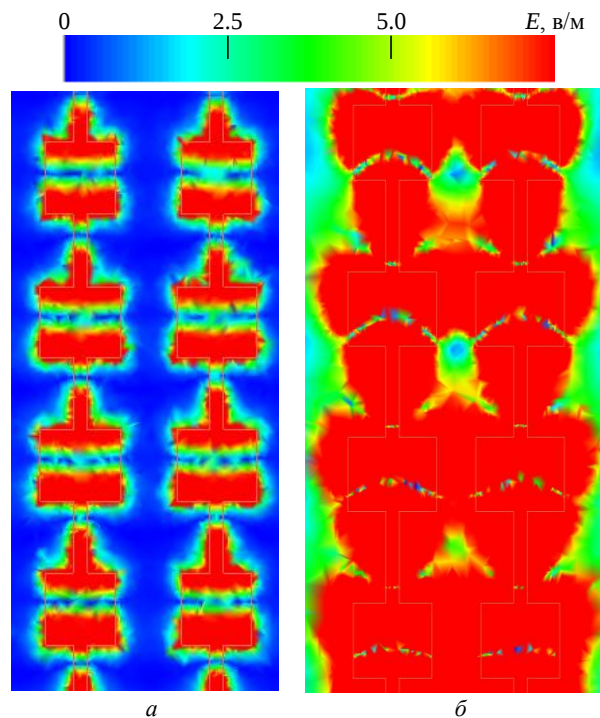


Рис. 10. Распределение напряженности электрического поля в соседних столбцах АР при реализации структуры: а – на подложке Rogers 4003; б – на подложке Rogers 4350

Fig. 10. Distribution of the electric field intensity in adjacent columns of the antenna when implementing the following structure: а – with a Rogers 4003 substrate; б – with a Rogers 4350 substrate

как следствие, к снижению КПД. В целом использование более тонкой подложки из диэлектрика с большим значением диэлектрической проницаемости позволяет улучшить характеристики АР.

Свойства направленности разработанной с учетом описанных конструктивных особенностей АР автомобильного радара (см. рис. 5) оценивались экспериментально путем измерения ДН парциальных лучей результирующей ДН в безэховой

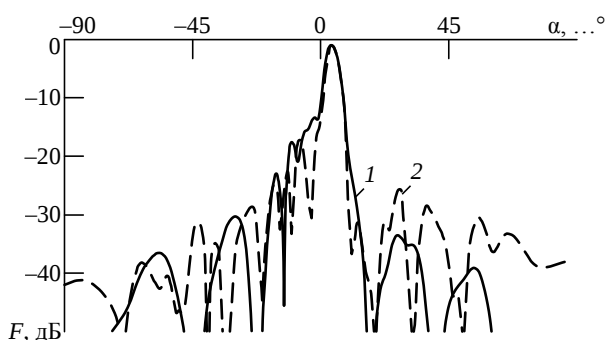


Рис. 11. Нормированная ДН АР в азимутальной плоскости: 1 – теоретическая; 2 – экспериментальная

Fig. 11. Normalized AA RP in the azimuth plane: 1 – theoretical; 2 – experimental

камере на площадке АО ПКК "Миландр" (Зеленоград). На рис. 11 показаны ДН луча АР, сформированного в направлении 6° относительно ее нормали. Кривая 1 представляет результат теоретического расчета, учитывающий только весовые функции распределения амплитуд по столбцам решетки, кривая 2 – результат измерения. Из рисунка видно, что основные характеристики ДН – ширина основного лепестка и УБЛ, полученные экспериментально, близки к теоретически достижимым.

Заключение. Линии передачи, соединяющие столбцы АР и каналы микросхемы, оказывают влияние на амплитудно-фазовое распределение поля, что искажает формируемую ДН в угломестной плоскости. Приведенные результаты моделирования структуры АР миллиметрового диапазона показывают, что применение копланарных линий позволяет уменьшить уровень паразитного излучения.

При реализации большого числа делителей мощности в структуре антенны происходит увеличение УБЛ в угломестной плоскости и искажение ДН. Экранирование области линий передачи, делителей мощности, а также микросхем позволяет значительно сократить влияние паразитного излучения и достигнуть заданного амплитудно-фазового распределения поля по апертуре. Размещение элементов АР с шагом, равным половине длины волны в свободном пространстве, требует близкого расположения соседних столбцов АР друг к другу. В связи с этим на основе сравнительного анализа использования материалов Rogers 4003 и Rogers 4350 в качестве подложки АР установлено, что более тонкая подложка из диэлектрика с большим значением диэлектрической проницаемости позволяет улучшить характеристики АР.

Список литературы

1. Radar Subsystems of Autonomous Mobile Robotic Systems for studying Tsunami in the Coastal Zone / P. O. Beresnev, A. A. Kurkin, A. A. Kuzin, A. V. Myakinkov, E. N. Pelinovsky, A. G. Ryndyk, S. A. Shabalin // Science of Tsunami Hazards. 2020. Vol. 39, iss. 3. P. 137–155.
2. Pirkani A. A., Pooni S., Cherniakov M. Implementation of MIMO beamforming on OTS FMCW Automotive Radar // Proc. Intern. Radar Symp. Ulm, Germany, 26–28 June, 2019. doi: 10.23919 /IRS.2019.8768103
3. Zwanetski A., Kronauge M., Rohling H. Waveform Design for FMCW MIMO Radar based on Frequency Division // 14th Intern. Radar Symp. (IRS). Dresden, Germany, 19–21 June, 2013. Piscataway: IEEE, 2013. Vol. 1. P. 89–94.
4. Bogdan T., Dorina I. Simulation of Automotive MIMO Radar // 14th Intern. Symp. of Electronics and Telecommunications. Conf. Timisoara, Romania, 5–6 Nov. 2020. Piscataway: IEEE, 2020. doi: 10.1109/ISETC50328.2020.9301103
5. Development of the Automotive Radar for the Systems of Adaptive Cruise Control and Automatic Emergency Breaking / V. N. Burov, A. A. Kuzin, A. V. Myakinkov, A. D. Pluzhnikov, A. G. Ryndyk, R. S. Fadeev, S. A. Shabalin, P. S. Rogov // Proc. of 2019 Intern. Conf. on Engineering and Telecommunication (EnT). 20–21 Nov. 2019, Dolgoprudny, Russia. Piscataway: IEEE, 2019. doi: 10.1109 /EnT47717.2019.9030600
6. Банков С. Е., Курушин А. А. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР. М.: Солон-пресс, 2017. 316 с.
7. Balanis C. A. Antenna Theory. Analysis and Design. 4th ed. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 2016. 1072 p.
8. Mailloux R. J. Phased Array Antenna Handbook. 3d ed. Boston: Artech House, Inc., 2018. 506 p.
9. Shabalin S. A., Myakinkov A. V., Kuzin A. A. Phased Array Antenna of Millimeter Range for Automotive Radar // Proc. of the 2019 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. Saint Petersburg, Russia, 28–31 Jan., 2019. Piscataway: IEEE, 2019. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8657164
10. Chen Z., Otto S. A Taper Optimization for Pattern Synthesis of Microstrip Series-fed Patch Array Antennas // Europ. Wireless Technology Conf. Rome, Italy, 28–29 Sept., 2009. Piscataway: IEEE, 2009. P. 160–163.
11. Jian B., Yuan J., Liu Q. Procedure to Design a Series-fed Microstrip Patch Antenna Array for 77 GHz Automotive Radar // Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conf. Taiyuan, China, 18–21 July 2019. Piscataway: IEEE, 2019. 2 p. doi: 10.1109/CSQRWC.2019.8799356
12. Pozar D. M. Microwave Engineering. 4th ed. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 2011. 736 p.
13. Rida A., Tentzeris M., Nikolaou S. Design of Low Cost Microstrip Antenna Arrays for mm-Wave Applications // IEEE Intern. Symp. on Anten. and Prop. Spokane, USA, 3–8 July, 2011. Piscataway: IEEE, 2011. P. 2071–2073. doi: 10.1109/APS.2011.5996916
14. A High-gain Circularly-polarized Patch Antenna Design using an Advanced Shielding Technique / S. P. Sun, C.-N. Chiu, Y.-C. Chuang, T.-C. Lin, H.-C. Hsieh // IEEE Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility and IEEE Asia-Pacific Symp. on Electromagnetic Compatibility. Suntec City, Singapore, 14–18 May, 2018. Piscataway: IEEE, 2018. P. 1067–1070. doi: 10.1109/ISEMC.2018.8393950
15. Jang T. H., Kim H. Y., Park C. S. A 60 GHz Self-shielded Yagi Antenna with Pyramidal Horn // Intern. Symp. on Anten. and Prop. Okinawa, Japan, 24–28 Oct., 2016. P. 786–787.

Информация об авторах

Кузин Андрей Алексеевич – доцент (2013) кафедры информационных радиосистем Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева (НГТУ). Автор 40 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокация, цифровая обработка сигналов.

Адрес: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, ул. Минина, 24, Нижний Новгород, 603950 Россия

E-mail: kuzin_andrey@nntu.ru

Мякинников Александр Валерьевич – доктор технических наук (2013), доцент (2010), профессор кафедры информационных радиосистем НГТУ, директор института радиоэлектроники и информационных технологий НГТУ. Автор 100 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокация, цифровая обработка сигналов.

Адрес: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, ул. Минина, 24, Нижний Новгород, 603950 Россия

E-mail: redvillage@mail.ru

Шабалин Семен Андреевич – инженер по специальности "Радиоэлектронные системы и комплексы" (2018, НГТУ), аспирант кафедры информационных радиосистем НГТУ (2018). Автор 10 научных работ. Сфера интересов – радиолокация, антенны и СВЧ-устройства.

Адрес: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, ул. Минина, 24, Нижний Новгород, 603950, Россия

E-mail: shabalin.semyon@yandex.ru

References

1. Beresnev P. O., Kurkin A. A., Kuzin A. A., Myakinkov A. V., Pelinovsky E. N., Ryndyk A. G., Shabalin S. A. Radar Subsystems of Autonomous Mobile Robotic Systems for studying Tsunami in the Coastal Zone. *Science of Tsunami Hazards*. 2020, vol. 39, iss. 3, pp. 137–155.
2. Pirkani A. A., Pooni S., Cherniakov M. Implementation of MIMO beamforming on OTS FMCW Automotive Radar. *Proc. Intern. Radar Symp. Ulm, Germany*, 26–28 June, 2019. doi: 10.23919 /IRS.2019.8768103
3. Zwanetski A., Kronauge M., Rohling H. Waveform Design for FMCW MIMO Radar based on Frequency Division. *14th Intern. Radar Symp. (IRS)*. Dresden, Germany, 19–21 June, 2013. Piscataway, IEEE, 2013, vol. 1, pp. 89–94.
4. Bogdan T., Dorina I. Simulation of Automotive MIMO Radar. *14th Intern. Symp. of Electronics and Telecommunications. Conf. Timisoara, Romania*, 5–6 Nov. 2020. Piscataway, IEEE, 2020. doi: 10.1109/SETC50328.2020.9301103
5. Burov V. N., Kuzin A. A., Myakinkov A. V., Pluzhnikov A. D., Ryndyk A. G., Fadeev R. S., Shabalin S. A., Rogov P. S. Development of the Automotive Radar for the Systems of Adaptive Cruise Control and Automatic Emergency Breaking. *Proc. of 2019 Intern. Conf. on Engineering and Telecommunication (EnT)*. 20–21 Nov. 2019, Dolgoprudny, Russia. Piscataway, IEEE, 2019. doi: 10.1109 /EnT47717.2019.9030600
6. Bankov S. E., Kurushin A. A. Electrodynamics and microwave Technology for CAD users. M., *Solon-press*, 2017, 316 p. (In Russ.)
7. Balanis C. A. *Antenna Theory. Analysis and Design*. 4th ed. Hoboken, John Wiley and Sons, Inc., 2016, 1072 p.
8. Mailloux R. J. *Phased Array Antenna Handbook*. 3d ed. Boston, Artech House, Inc., 2018, 506 p.
9. Shabalin S. A., Myakinkov A. V., Kuzin A. A. Phased Array Antenna of Millimeter Range for Automotive Radar. *Proc. of the 2019 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. Saint Petersburg, Russia, 28–31 Jan., 2019. Piscataway, IEEE, 2019. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8657164
10. Chen Z., Otto S. A Taper Optimization for Pattern Synthesis of Microstrip Series-fed Patch Array Antennas. *Europ. Wireless Technology Conf. Rome, Italy*, 28–29 Sept., 2009. Piscataway, IEEE, 2009, pp. 160–163.
11. Jian B., Yuan J., Liu Q. Procedure to Design a Series-fed Microstrip Patch Antenna Array for 77 GHz Automotive Radar. *Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conf. Taiyuan, China*, 18–21 July 2019. Piscataway, IEEE, 2019, 2 p. doi: 10.1109/CSQRWC.2019.8799356
12. Pozar D. M. *Microwave Engineering*. 4th ed. Hoboken, John Wiley and Sons, Inc., 2011, 736 p.
13. Rida A., Tentzeris M., Nikolaou S. Design of Low Cost Microstrip Antenna Arrays for mm-Wave Applications. *IEEE Intern. Symp. on Anten. and Prop.* Spokane, USA, 3–8 July, 2011. Piscataway, IEEE, 2011, pp. 2071–2073. doi: 10.1109/APS.2011.5996916
14. Sun S. P., Chiu C.-N., Chuang Y.-C., Lin T.-C., Hsieh H.-C. A High-gain Circularly-polarized Patch Antenna Design using an Advanced Shielding Technique. *IEEE Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility and IEEE Asia-Pacific Symp. on Electromagnetic Compatibility*. Suntec City, Singapore, 14–18 May, 2018. Piscataway, IEEE, 2018, pp. 1067–1070. doi: 10.1109/ISEMC.2018.8393950
15. Jang T. H., Kim H. Y., Park C. S. A 60 GHz Self-shielded Yagi Antenna with Pyramidal Horn. *Intern. Symp. on Anten. and Prop.* Okinawa, Japan, 24–28 Oct., 2016, pp. 786–787.

Information about the authors

Andrey A. Kuzin, Associate Professor (2013) of the department of informational radio systems of Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev (NSTU). The author of 40 scientific publications. Area of expertise: radiolocation, digital signal processing.

Address: Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, 24 Minin St., Nizhny Novgorod, 603950 Russia

E-mail: kuzin_andrey@nntu.ru

Aleksandr V. Miakinkov, Dr. Sci. (Eng.) (2013), Associate Professor (2010), Professor of the department of informational radio systems of NSTU, director of the Institute of radio electronics and informational technology of NNSTU. The author of 100 scientific publications. Area of expertise: radiolocation, digital signal processing.

Address: Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, 24 Minin St., Nizhny Novgorod, 603950 Russia

E-mail: redvillage@mail.ru

Semen A. Shabalin, Engineer on Electronic systems and complexes (2018, NSTU), the post-graduate student of the department of informational radio systems of NSTU. The author of 10 scientific publications. Area of expertise: radiolocation, antennas and microwave devices.

Address: Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, 24 Minin St., Nizhny Novgorod, 603950 Russia

E-mail: shabalin.semyon@yandex.ru

Телевидение и обработка изображений

УДК 004.931; 004.932

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-49-59>

Метод автоматического определения трехмерной траектории транспортных средств на изображении

И. Г. Зубов^{1✉}, Н. А. Обухова²

¹ООО "НЕКСТ", Москва, Россия

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

✉ZubovIG@gmail.com

Аннотация

Введение. Важной составной частью системы управления беспилотным транспортным средством (ТС) является модуль анализа окружающего пространства. Традиционно его реализуют на основе датчиков разного типа, включая видеокамеры, лидары и радары. Развитие вычислительной и телевизионной техники позволяет реализовать модуль анализа окружающего пространства используя в качестве датчиков только видеокамеры, что снижает себестоимость модуля в целом. Основной задачей при обработке видеоданных является анализ окружающего пространства как трехмерной сцены. Трехмерная траектория объекта, в которой наряду с его локализацией на изображении учтены также габаритные размеры, ракурс (угол поворота) и вектор движения, предоставляет исчерпывающую информацию для анализа реального взаимодействия объектов. Основой построения трехмерной траектории является оценка ракурса ТС.

Цель работы. Разработка метода автоматической оценки ракурса ТС на основе анализа видеоданных от одной видеокамеры.

Методы и материалы. Предложен автоматический метод оценки ракурса ТС на изображении на основе каскадного подхода. Метод включает локализацию ТС, определение его ключевых точек, сегментацию ТС и оценку ракурса. Локализация ТС и определение его ключевых точек решены на основе сверточной нейронной сети. Сегментацию ТС и формирование маски объекта выполняют с переходом в полярную систему координат и поиском внешнего контура с помощью алгоритмов теории графов. Целевой ракурс ТС определяют сопоставлением Фурье-образа сигнатур маски ТС и шаблонов, полученных на основе трехмерных моделей.

Результаты. Эксперименты подтвердили корректность определения ракурса ТС на основе предложенного метода. Точность определения ракурса ТС на открытом наборе изображений Carvana составила 89 %.

Заключение. Предложен новый подход к задаче оценки ракурса ТС, предполагающий переход от сквозного обучения нейронных сетей для решения сразу нескольких задач, таких, как локализация, классификация, сегментация и определение ракурса, к каскадному анализу информации. Обеспечение высокой точности оценки ракурса при сквозном обучении требует больших репрезентативных наборов данных, что затрудняет масштабируемость решений для условий российских дорог. Предложенный метод позволяет определять ракурс ТС с высокой точностью без больших затрат на ручную аннотацию данных и обучение.

Ключевые слова: сверточные нейронные сети, анализ карт активаций, локализация ключевых точек, сегментация изображений, сопоставление с шаблоном

Для цитирования: Зубов И. Г., Обухова Н. А. Метод автоматического определения трехмерной траектории транспортных средств на изображении // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 3. С. 49–59. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-49-59

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 09.04.2021; принята к публикации после рецензирования 10.05.2021; опубликована онлайн 29.06.2021

© Зубов И. Г., Обухова Н. А., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License

Method for Automatic Determination of a 3D Trajectory of Vehicles in a Video Image

Ilya G. Zubov^{1✉}, Natalya A. Obukhova²

¹ Ltd "Next", Moscow, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ ZubovIG@gmail.com

Abstract

Introduction. An important part of an automotive unmanned vehicle (UV) control system is the environment analysis module. This module is based on various types of sensors, e.g. video cameras, lidars and radars. The development of computer and video technologies makes it possible to implement an environment analysis module using a single video camera as a sensor. This approach is expected to reduce the cost of the entire module. The main task in video image processing is to analyse the environment as a 3D scene. The 3D trajectory of an object, which takes into account its dimensions, angle of view and movement vector, as well as the vehicle pose in a video image, provides sufficient information for assessing the real interaction of objects. A basis for constructing a 3D trajectory is vehicle pose estimation.

Aim. To develop an automatic method for estimating vehicle pose based on video data analysis from a single video camera.

Materials and methods. An automatic method for vehicle pose estimation from a video image was proposed based on a cascade approach. The method includes vehicle detection, key points determination, segmentation and vehicle pose estimation. Vehicle detection and determination of its key points were resolved via a neural network. The segmentation of a vehicle video image and its mask preparation were implemented by transforming it into a polar coordinate system and searching for the outer contour using graph theory.

Results. The estimation of vehicle pose was implemented by matching the Fourier image of vehicle mask signatures and the templates obtained based on 3D models. The correctness of the obtained vehicle pose and angle of view estimation was confirmed by experiments based on the proposed method. The vehicle pose estimation had an accuracy of 89 % on an open Carvana image dataset.

Conclusion. A new approach for vehicle pose estimation was proposed, involving the transition from end-to-end learning of neural networks to resolve several problems at once, e.g., localization, classification, segmentation, and angle of view, towards cascade analysis of information. The accuracy level of end-to-end learning requires large sets of representative data, which complicates the scalability of solutions for road environments in Russia. The proposed method makes it possible to estimate the vehicle pose with a high accuracy level, at the same time as involving no large costs for manual data annotation and training.

Keywords: convolutional neural networks, analysis of activation maps, detection of key points, image segmentation, pattern matching

For citation: Zubov I. G., Obukhova N. A. Method for Automatic Determination of a 3D Trajectory of Vehicles in a Video Image. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 3, pp. 49–59. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-49-59

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

Submitted 09.04.2021; accepted 10.05.2021; published online 29.06.2021

Введение. Системы технического зрения используют сегодня для решения широкого круга задач. Среди них одной из наиболее приоритетных является задача обеспечения безопасности на дороге, решение которой предполагает развитие беспилотных транспортных средств (ТС).

Важная составная часть системы управления беспилотным ТС – модуль анализа окружающего пространства. Традиционно его реализуют на основе датчиков разного типа, включая видеокамеру, лидары и радары. Датчики последних двух типов являются достаточно дорогостоящими.

Развитие вычислительной и телевизионной техники позволяет реализовать модуль анализа окружающего пространства, используя в качестве датчика только видеокамеру, что существенно снижает себестоимость модуля в целом.

Внедрение датчиков на основе видеокамеры (монокулярной камеры) доказало свою эффективность в таких задачах, как анализ дорожного трафика и система помощи водителю [1, 2]. Эти системы позволяют уменьшить риск столкновения с пешеходом и иным ТС, а также предотвратить сход с полосы движения и т. д.

подавляющее большинство существующих систем на основе монокулярных камер ориентировано на анализ окружающего ТС пространства как двумерного изображения [3–9]. Однако объекты взаимодействуют в физическом пространстве сцены, которое является трехмерным. Следовательно, основной задачей систем технического зрения является анализ окружающего пространства как трехмерной сцены. В силу этого для получения исчерпывающей информации об объектах и для анализа их реального взаимодействия необходимо определить их трехмерные траектории. Под такой траекторией подразумевается локализация объекта на изображении, определение его габаритных размеров, ракурса (угол поворота) α [10] (рис. 1) и вектора движения.

Базой для построения трехмерной траектории является определение ракурса ТС. Современные методы определения ракурса на основе видеоданных, как правило, основаны на глубоком обучении (Deep Learning) нейросетевых моделей [11–14]. В подавляющем большинстве случаев сверточные нейронные сети (НС) для задачи оценки ракурса ТС обучаются сквозным способом для решения сразу нескольких

задач, таких, как локализация, классификация, сегментация, определение ракурса и т. д. Точность такого подхода в основном зависит от репрезентативности обучающей выборки. Открытые наборы данных, как правило, не включают в себя изображения, полученные при различных условиях наблюдения (различные погодные условия, разное время суток и точка наблюдения и т. д.), поэтому разработанные методы являются слабо масштабируемыми.

Определение ракурса ТС на основе видеоданных – задача, слабо изученная по сравнению с такими задачами, как локализация, классификация и сегментация объектов. Для последних перечисленных задач существуют большие наборы открытых размеченных данных. Представляется целесообразным разбить задачу оценки ракурса на подзадачи, уровень изученности которых намного больше.

В настоящей статье предложен новый метод определения ракурса ТС, основанный на каскадном анализе информации. Метод позволяет определить ракурс ТС без больших затрат на ручную аннотацию данных и обучение. Достигнутая точность определения ракурса ТС составляет 89 % на открытом наборе изображений Carvana.

Структурная схема предложенного метода представлена на рис. 2. На первом шаге анализируют изображение нейросетевым детектором объектов, в результате чего получают информацию о местоположении ТС на изображении. Далее с помощью предложенного алгоритма анализа внутренних сверточных слоев НС и изменения ее архитектуры локализуют ключевые точки, принадлежащие объекту интереса.

На третьем шаге, используя априорную информацию о местоположении ТС и ключевых точек на изображении, проводят сегментацию изображения и формируют маску объекта. Из полученной маски ТС извлекают сигнатуры – зависимости расстояния от ключевой точки до границ объекта как функции угла. Фурье-образ сигнатур является ключевым признаком, на основе которого определяют ракурс ТС.

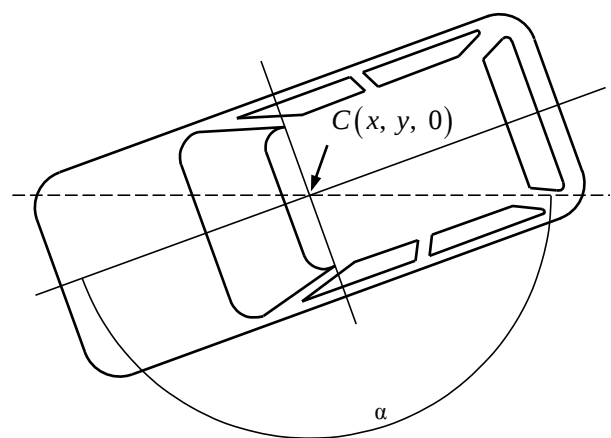


Рис. 1. Автомобиль, описываемый ориентацией α и центроидом на плоскости земли C

Fig. 1. Vehicle, described by orientation α and centroid on the ground plane C

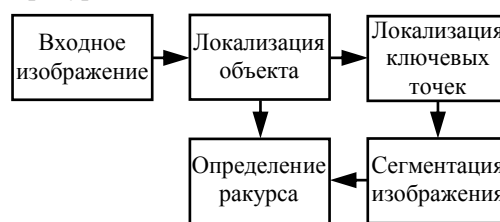


Рис. 2. Функциональная схема метода определения ракурса ТС

Fig. 2. Block scheme of the method for determining the vehicle pose

Для оценки ракурса предварительно на основе трехмерных моделей формируют шаблоны возможных ракурсов ТС. Целевой ракурс ТС определяют сопоставлением Фурье-образа сигнатур маски ТС и шаблонов, полученных на основе трехмерных моделей. Ракурс целевого ТС определяют как ракурс шаблона, имеющего наибольший коэффициент корреляции Пирсона [15].

Далее в настоящей статье подробно рассмотрены описанные шаги предложенного каскадного метода.

Локализация ТС. ТС являются одним из основных объектов, присутствующих во многих классических наборах данных для обнаружения и распознавания, таких, как PASCAL-VOC [16], ImageNet [17] и COCO [18], поэтому на шаге локализации ТС целесообразно использовать известную модель. Приняв на вход изображение, НС выдает координаты ограничивающих объекты прямоугольников и вероятности принадлежности выделенных изображений объектов классам. При выборе НС учтены следующие критерии: высокое быстродействие и точность локализации, достаточная для дальнейшего эффективного анализа. В результате использована сеть YOLOv4 [9], обладающая высокой скоростью анализа (около 65 кадров в секунду на NVIDIA Tesla V100) и достаточной средней точностью (43.5 % по набору данных COCO).

Локализация ключевых точек. Как показано в [19], промежуточные выходы сверточных НС часто связаны с семантическими частями объектов, причем несколько промежуточных сверточных слоев могут быть ассоциированы с одной и той же частью [20]. В последнем случае объединение выходных сигналов этих слоев позволяет локализовать ключевую точку объекта интереса.

Для извлечения ключевых точек, принадлежащих отдельным частям ТС, была проанализирована НС YOLOv4 с базовой структурой CSPDarknet53 [9]. Чтобы произвести анализ каждого слоя НС, необходимо изменить ее архитектуру. Для анализа внутренних слоев был добавлен выход к каждому активационному слою с последующим масштабированием выходной матрицы до разрешения входного изображения (рис. 3).

Измененная структура имеет 2 выхода: один, локализуя объекты на изображении, а второй в виде матрицы всех промежуточных сверточных слоев базовой структуры с размерами $W \times H \times N$, где W и H – высота и ширина входного изображения соответственно; N – количество промежуточных сверток НС.

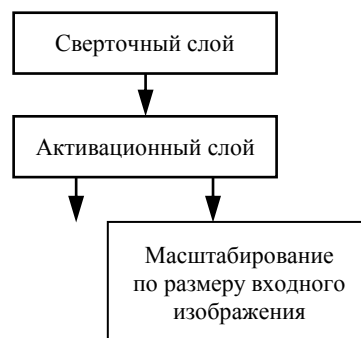


Рис. 3. Добавление выходного канала в базовую структуру

Fig. 3. Adding an output channel to the basic structure

Для дальнейшего анализа необходим набор аннотированных данных X – множество изображений (I) и масок (A_k). Набор должен содержать информацию о местоположении k -й интересующей части объекта. Пример аннотации представлен на рис. 4.

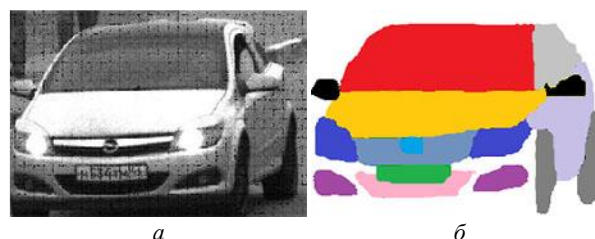


Рис. 4. Пример аннотации: a – исходное изображение; b – маски частей ТС

Fig. 4. An example of annotation: a – the original image; b – masks of vehicle constructive parts

Для определения ключевой точки необходимо выделить сверточные слои и каналы, удовлетворяющие двум условиям:

– активирующиеся в интересующей области

$$\hat{l}_{ijk} = \{Q_{ijk} \geq th_1\};$$

– не активирующиеся в интересующей области

$$\tilde{l}_{ijk} = \{Q_{ijk} \leq th_2\},$$

где

$$Q_{ijk} = \sum_{\{I, A_k \in X\}} \frac{\sum_{\substack{y \in 1, H \\ x \in 1, W}} f_{ij}[I(y, x)] A_k(y, x)}{\sum_{\substack{y \in 1, H \\ x \in 1, W}} f_{ij}[I(y, x)]}$$

– доля сосредоточения активации в области интереса в j -м канале i -го слоя НС; th_1 , th_2 – пороги, причем $f_{ij}(I)$ – результат функции активации i -го слоя, j -го канала, масштабированный до размера входного изображения. Порог th_1 выбирается экспериментально.

Порог th_2 выбирается в зависимости от функции активации, используемой в анализируемой архитектуре. Например, при использовании функции активации ReLU [21], $th_2 = 0$ будет указывать на полное отсутствие активации нейрона в области интереса.

Элементы, не входящие в множества $\hat{l}_{ijk}$ и $\tilde{l}_{ijk}$, могут быть удалены из дополнительного выходного слоя измененной архитектуры НС (см. рис. 3).

Агрегируя данные с выхода базовой структуры НС, получим новое изображение I' , элементы которого, локализованные в интересующей части объекта, обладают наибольшими значениями интенсивности (рис. 5):

$$F(x, y, k) = \sum_{\substack{i, j, k \in \hat{l}_{ijk} \\ y \in \hat{H} \\ x \in \hat{W}}} f_{ij}[I'(x, y)] - \sum_{\substack{i, j, k \in \tilde{l}_{ijk} \\ y \in \tilde{H} \\ x \in \tilde{W}}} f_{ij}[I'(x, y)].$$

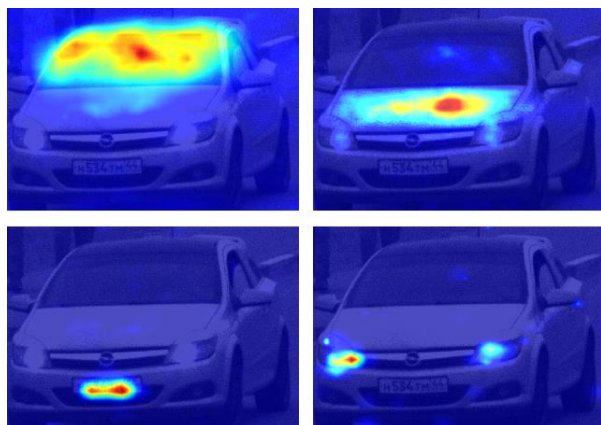


Рис. 5. Пример визуализации агрегированных выходов базовой структуры нейронной сети YOLOv4

Fig. 5. Visualization sample of the intermediate outputs of the convolutional layers of YOLOv4 neural network

НС принимает на вход изображение I' и выдает координаты ограничивающего прямоугольника: левого верхнего угла $x_{\min}, y_{\min}$ и правого нижнего угла $x_{\max}, y_{\max}$. Чтобы получить координаты ключевой точки этого изображения, воспользуемся выражением

$$x_{\text{кл}}, y_{\text{кл}} = \arg \max_{\substack{x' \in x_{\min}, x_{\max}; \\ y' \in y_{\min}, y_{\max}}} F(x', y').$$

Сегментация изображения. Сегментация изображения производится на основе модификации ранее предложенного одним из авторов настоящей статьи метода [22].

Основные шаги метода сегментации.

1. *Масштабирование изображения.* Изображение (рис. 6, а) масштабируется с помощью метода билинейной интерполяции [23] таким образом, чтобы соотношение сторон составляло 1:1 (рис. 6, б).

2. *Детектирование границ.* На данном шаге выделяют контуры с помощью фильтра Кэнни [24] (рис. 6, в).

3. *Преобразование в полярную систему координат.* Каждый пиксел $M(x', y')$ полученного множества описывается в полярной системе координат, используя центр масштабированного изображения как начало координат:

$$r = \sqrt{(x' + w/2)^2 + (y' + h/2)^2}; \quad (1)$$

$$\text{tg } \varphi = (2y' + h)/(2x' + w), \quad (2)$$

где r – расстояние от пиксела до центра ограничивающего объект параллелепипеда $O = (w/2, h/2)$;

$h = y_{\max} - y_{\min}$; $w = x_{\max} - x_{\min}$; φ – угол, образованный лучом OM с полярной осью.



Рис. 6. Предобработка изображения: а – исходное изображение выделенного объекта; б – масштабированное изображение; в – результат обработки детектором Кэнни

Fig. 6. Image preprocessing: а – the original image of the selected object; б – the scaled image; в – the result of processing using the Canny detector

Преобразование элементов множества в полярную систему координат позволяет описать распределение внешнего контура объекта во всей области полярного угла $0 < \varphi \leq 2\pi$.

4. *Поиск кратчайшего пути в графе.* Исходя из того, что внешний контур объекта определен для всего диапазона полярного угла от 0 до 2π , задачу выделения внешнего контура объекта на изображении можно представить как поиск кратчайшего пути во взвешенном графе. Таким образом, проблема нахождения внешнего контура сводится к поиску пути наименьшего веса.

Представим результат полярного преобразования на шаге 3 в прямоугольной системе координат (рис. 7) с высотой h_φ и шириной w_φ . Полученное изображение R представляется в виде ориентированного взвешенного графа G , ребрами на котором соединены только ближайшие соседи. Под ближайшим соседом пиксела q понимаются пикселы p , каждая из координат которых отличается от координат q не больше чем на единицу:

$$(\varphi'_p - \varphi'_q = 1) \vee (|r'_p - r'_q| \leq 1),$$

где $\varphi'_q, r'_q; \varphi'_p, r'_p$ – координаты пикселов q и p соответственно в представлении графа в прямоугольной системе координат.

Существенно влияет на результаты сегментации определение веса ребра, характеризующего меру сходства ближайших соседей. С учетом того, что внешний контур объекта расположен вблизи наибольшего радиуса, вес ребер графа, разделяю-

щего 2 соседних пиксела p и q , выбран следующим образом:

$$d(p, q) = 2h_\varphi - R(\varphi'_q, r'_q)r'_q - R(\varphi'_p, r'_p)r'_p.$$

Из существующего разнообразия методов, использующих теорию графов, выбран алгоритм поиска кратчайшего пути A^* [25]. Этот алгоритм находит путь наименьшей стоимости от заданного начального до целевого узла (из одной или нескольких возможных целей). A^* использует оценку наименьших затрат вида

$$f(v) = g(v) + j(v),$$

где v – текущая вершина; $g(v)$ – наименьшее расстояние от стартовой вершины до текущего положения; $j(v)$ – эвристическая функция (манхэттенское расстояние) приближения расстояния от текущего местоположения до конечной цели.

В качестве начальной и конечной вершин были выбраны точки с координатами $(0, h_\varphi/2)$ и $(w_\varphi, h_\varphi/2)$ соответственно.

На рис. 8 представлен результирующий путь с наименьшим весом, рассчитанный по алгоритму A^* для изображения на рис. 7.

5. *Формирование маски объекта.* Используя обратное преобразование выражений (1), (2), полученный путь переводится в декартову систему координат. В результате формируется замкнутый контур, описывающий объект интереса, – маска

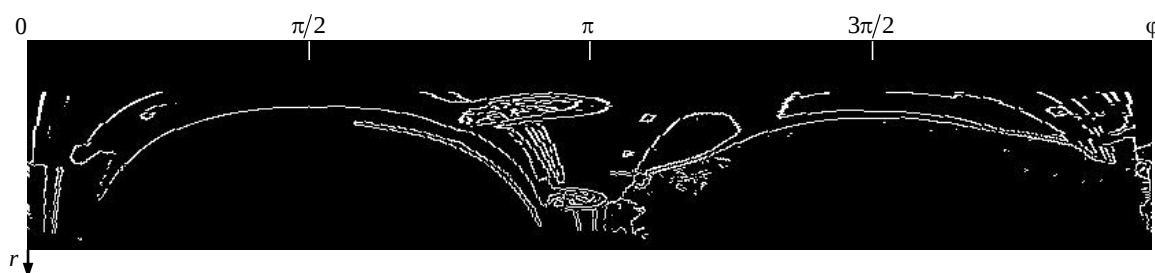


Рис. 7. Результат полярного преобразования, представленный в прямоугольной системе координат

Fig. 7. The result of a polar transformation represented in a rectangular coordinate system

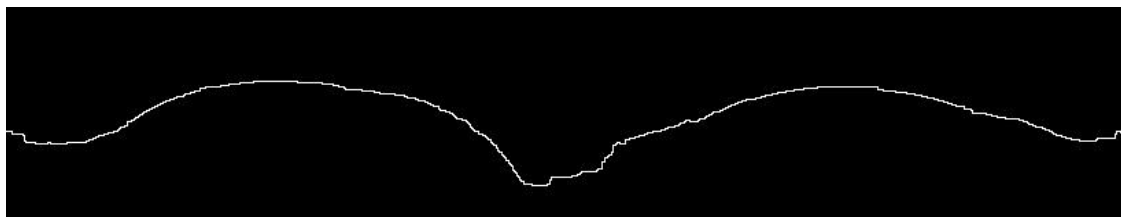


Рис. 8. Результат выделения кратчайшего пути по графу

Fig. 8. The result of the selection of the shortest path through the graph



Рис. 9. Результат работы алгоритма

Fig. 9. The result of the algorithm operation

объекта. Расположив маску на изображении, пиксели, попавшие в ее область, выделяются в качестве изображения объекта (рис. 9). Тем самым решается задача формирования сегментированного изображения.

Определение ракурса. ТС является жестким объектом, внешний вид которого зависит от марки автомобиля и точки наблюдения. В связи с этим для классификации ракурса воспользуемся методом, основанным на сопоставлении признаков исходного объекта и шаблонов, полученных на основе трехмерных моделей [15].

Опишем полученный на предыдущем шаге контур с помощью сигнатуры (одномерной функции). Зададим сигнатуру как зависимость расстояния от ключевой точки объекта до его границы, нормированного на его максимальное значение, в функции угла (рис. 10):

$$r_n(\varphi) = r(\varphi) / \max r(\varphi).$$

Такие сигнатуры инвариантны к параллельному переносу, однако зависят от поворота и изменения масштаба. Чтобы получить инвариантность к изменению масштаба, воспользуемся дискретным преобразованием Фурье [24]. Вычислим ДПФ:

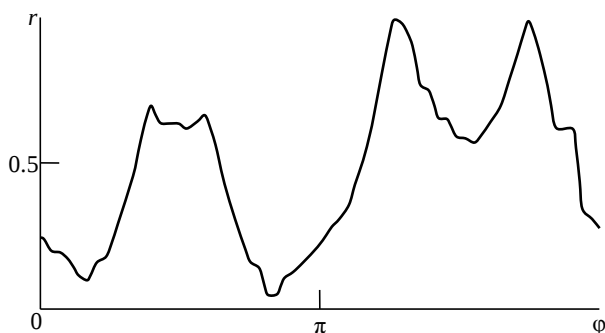


Рис. 10. Пример сигнатуры ТС

Fig. 10. An example of the vehicle signature

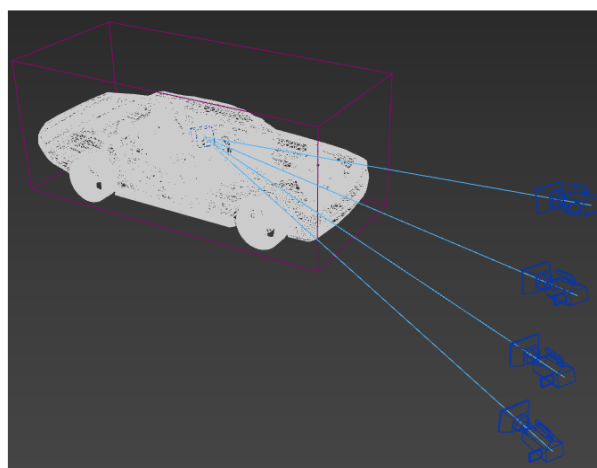


Рис. 11. Пример формирования шаблонов

Fig. 11. An example of forming templates

$$X_k = \sum_{\varphi=0}^{2\pi} r_n(\varphi) e^{-ik\varphi}.$$

В качестве набора эталонных данных предлагается использовать изображения разных ракурсов ТС, полученных из трехмерных моделей (рис. 11).

Трехмерные модели выбраны таким образом, чтобы представить внутриклассовые вариации определенной категории. Например, в качестве категории автомобиля выбраны седан, купе, внедорожник, хэтчбек и т. д. Высота точки наблюдения и количество ракурсов ТС выбираются в зависимости от условий эксплуатации.

Ракурс целевого ТС α (см. рис. 1) определяется как ракурс шаблона, с которым ракурс целевого ТС имеет наибольшее значение коэффициента корреляции Пирсона:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^m (\varphi_i - \bar{\varphi})(r_{ni} - \bar{r}_n)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (\varphi_i - \bar{\varphi})^2 \sum_{i=1}^m (r_{ni} - \bar{r}_n)^2}},$$

где $\bar{\varphi}$, $\bar{r}_n$ – математические ожидания полярного угла и полярного радиуса соответственно.

Локализованные ранее ключевые точки позволяют производить анализ ракурса в ограниченном диапазоне, что снижает количество необходимых сравнений с шаблоном и увеличивает точность метода.

Результаты. Экспериментальная проверка предложенного метода проводилась с использованием набора изображений Carvana [26], в котором содержится 318 ТС различных классов, каждое из которых представлено 16 ракурсами (пример на рис. 12).

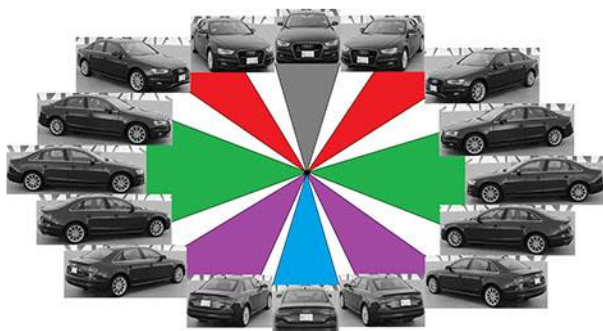


Рис. 12. Дискретизация ракурса ТС в зависимости от расположения ключевых точек

Fig. 12. Discretization of the vehicle pose estimation depending on key points collocation

Точность определение ракурса ТС для каждого класса

The accuracy level when determining the vehicle pose and angle of view for each class

Метрика	Класс															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
precision	0.97	0.92	0.84	0.94	0.74	0.86	0.78	0.92	0.93	0.80	0.96	0.98	0.86	0.95	0.95	0.99
recall	0.92	0.97	0.97	0.55	0.56	0.58	0.94	1.00	0.97	1.00	1.00	0.99	0.99	0.97	0.99	0.98
F1	0.95	0.94	0.90	0.69	0.64	0.69	0.86	0.96	0.95	0.89	0.98	0.98	0.92	0.96	0.97	0.98

Указанная база изображений была получена с помощью настраиваемой вращающейся фотостудии.

Для определения качества предложенного метода используются следующие метрики точности:

$$\text{precision} = \frac{TP}{TP + FP}; \text{ recall} = \frac{TP}{TP + FN};$$

$$F1 = \frac{TP}{TP + 0.5(FP + FN)},$$

где TP – правильно назначенные положительные классификации; FP – ложно назначенные положительные классификации; FN – ложно назначенные отрицательные классификации.

В таблице представлены результаты эксперимента для каждого отдельного класса, а на рис. 13 представлена матрица ошибок [27].

Для сравнения разработанного метода определения ракурса с аналогами была использована нейросетевая модель AAVER [28] в реализации, представленной в [29]. Средняя точность предложенного метода на наборе изображений Carvana составила 89 % против 68 % у аналога.

Вывод. В статье представлен новый метод автоматического определения трехмерной траектории ТС на изображении. Разработанный метод позволяет извлекать информацию о местоположении ключевых точек, сегментировать изображение и определять ракурс ТС. Работоспособность предложенного метода проверена тестированием на открытой базе изображений Carvana. Разработанный метод оценки ракурса ТС не требует трудоемкой разметки данных и обучения нейросетевой модели. Для определения ракурса ТС метод использует трехмерную модель ТС. Точность предложенного метода на базе изображений Carvana составила 89 %.

1	0.92	0	0	0	0	0	0	0	0.08	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0.97	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0	0	0	0	0	0
3	0	0.02	0.97	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0
4	0	0.03	0.15	0.55	0.08	0	0.03	0.03	0	0.04	0	0.02	0.05	0	0	0
5	0	0.02	0.02	0.03	0.56	0.07	0.02	0	0	0.18	0	0	0.09	0	0	0
6	0	0.02	0	0	0.11	0.58	0.20	0.02	0	0.01	0.02	0	0.01	0.04	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0.94	0.02	0	0	0	0	0	0	0.04	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0.97	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0.99	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0.99	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0.97	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.99	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0.98
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Предсказанный ракурс

Рис. 13. Матрица ошибок

Fig. 13. Confusion matrix

Список литературы

1. Forward Collision Warning with a Single Camera / E. Dagan, O. Mano, G. P. Stein, A. Shashua // Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symp., Parma, Italy, 14–17 Jun. 2004. Piscataway: IEEE, 2004. P. 37–42. doi: 10.1109/IVS.2004.1336352

2. Комплекс видеофиксации нарушений ПДД "ИСКРА-ВИДЕО-2" КР. URL: http://www.simicon.ru/rus/product/gun/archive/iv2_k.html (дата обращения 29.08.2020)

3. MMDetection: open MMLab detection Toolbox and Benchmark / K. Chen, J. Wang, J. Pang, Y. Cao, Y. Xiong,

X. Li, S. Sun, W. Feng, Z. Liu, J. Xu, Z. Zhang, D. Cheng, C. Zhu, T. Cheng, Q. Zhao, B. Li, X. Lu, R. Zhu, Y. Wu, J. Dai, J. Wang, J. Shi, W. Ouyang, C. C. Loy, D. Lin. URL: <https://arxiv.org/pdf/1906.07155.pdf> (дата обращения 29.08.2020)

4. SSD: Single Shot MultiBox Detector / W. Liu, D. Anguelov, D. Erhan, C. Szegedy, S. Reed, C.-Y. Fu, A. C. Berg // Europ. Conf. on Computer Vision, ECCV 2016, Amsterdam, The Netherlands, 8–16 Oct. 2016. P. 21–37. doi: 10.1007/978-3-319-46448-0_2.

5. Focal loss for dense object detection / T.-Y. Lin, P. Goyal, R. Girshick, K. He, P. Dollar // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2018. Vol. PAMI-42, iss. 2. P. 318–327.

6. Li B., Liu Y., Wang X. Gradient Harmonized Single-stage Detector // Thirty-Third AAAI Conf. on Artificial Intelligence, AAAI-19, Jan. 27 – Feb. 1, 2019. P. 8577–8584.

7. FCOS: Fully Convolutional One-Stage Object Detection / Z. Tian, C. Shen, H. Chen, T. He. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1904.01355> (дата обращения 29.08.2020)

8. Mask R-CNN / K. He, G. Gkioxari, P. Dollar, R. Girshick // IEEE Intern. Conf. on Computer Vision, ICCV 2017, Venice, Italy, Oct. 22–29, 2017. URL: <https://arxiv.org/pdf/1703.06870.pdf> (дата обращения 29.08.2020)

9. Bochkovskiy A., Wang C.-Y., Mark Liao H.-Y. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection. URL: <https://arxiv.org/pdf/2004.10934.pdf> (дата обращения 21.02.2021)

10. Classification and Pose Estimation of Vehicles in Videos by 3D Modeling within Discrete-Continuous Optimization / M. Hoedlmoser, B. Micusik, M.-Y. Liu, M. Pollefeys, M. Kampel // 2nd Intern. Conf. on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT), Zurich, Switzerland, 13–15 Oct. 2012. Piscataway: IEEE, 2012. P. 198–205. doi: 10.1109/3DIMPVT.2012.23

11. Subcategory-aware Convolutional Neural Networks for Object Proposals and Detection / Y. Xiang, W. Choi, Y. Lin, S. Savarese, 2017. URL: <https://arxiv.org/abs/1604.04693>. (дата обращения 02.06.2020)

12. 3D Bounding Box Estimation using Deep Learning and Geometry / A. Mousavian, D. Anguelov, J. Flynn, J. Kosecka. 2017. URL: <https://arxiv.org/abs/1612.00496> (дата обращения 02.06.2020)

13. Monocular 3D Object Detection for Autonomous Driving / X. Chen, K. Kundu, Z. Zhang, H. Ma, S. Fidler, R. Urtasun // IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2016, Las Vegas, USA, June 27–30, 2016. Piscataway: IEEE, 2016. P. 2147–2156.

14. 6-DoF Object Pose from Semantic Keypoints / G. Pavlakos, X. Zhou, A. Chan, K. G. Derpanis, K. Daniilidis // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Singapore, 29 May – 3 June, 2017. Piscataway: IEEE, 2017. P. 2011–2018. doi: 10.1109/ICRA.2017.7989233

15. Zubov I. G. Vehicle Pose Estimation Based on Object Contour // IEEE Conf. of Russian Young Researchers

in Electrical and Electronic Engineering, ELCONRUS 2020, St Petersburg and Moscow, 27–30 Jan. 2020. Piscataway: IEEE, 2020. P. 1452–1454. doi: 10.1109/ElConRus49466.2020.9039472

16. The PASCAL Visual Object Classes Challenge (VOC2007). URL: <http://www.pascal-network.org/challenges/VOC/voc2007/index.html> (дата обращения 01.06.2020)

17. ImageNet: A Large-Scale Hierarchical Image Database / J. Deng, W. Dong, R. Socher, L.-J. Li, K. Li, L. Fei-Fei // Computer Vision and Pattern Recognition. 2009, CVPR 2009, Miami, USA, Jun. 20–25, 2009. P. 248–255. doi: 10.1109/CVPR.2009.5206848

18. Microsoft COCO: Common Objects in Context / T.-Y. Lin, M. Maire, S. Belongie, L. Bourdev, R. Girshick, J. Hays, P. Perona, D. Ramanan, C. L. Zitnick, P. Dollar // Europ. Conf. on Computer Vision. ECCV 2014, Zurich, Switzerland, Sept. 6–12, 2014. P. 740–755. doi: 10.1007/978-3-319-10602-1_48

19. Zeiler M. D., Fergus R. Visualizing and Understanding Convolutional Networks // Proc. of the ECCV Europ. Conf. on Computer Vision, Zurich, Switzerland, 6–12 Sept. 2014. Piscataway: IEEE, 2014. P. 818–833. doi: 10.1007/978-3-319-10590-1_53

20. Зубов И. Г. Метод автоматического определения ключевых точек объекта на изображении // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 6. С. 6–16. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-6-16

21. Deep Residual Learning for Image Recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun // IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2016, Las Vegas, USA, Jun. 27–30, 2016. Piscataway: IEEE, 2016. P. 770–778. doi: 10.1109/CVPR.2016.90

22. Зубов И. Г. Метод автоматической сегментации транспортных средств на изображении // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 5. С. 6–16. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-6-16

23. Щерба Е. В. Анализ применимости методов интерполяции и экстраполяции для решения задачи восстановления изображения // Компьютерная оптика. 2009. Т. 33, № 3. С. 336–339. URL: <http://www.computeroptics.smr.ru/KO/PDF/KO33-3/33313.pdf> (дата обращения 20.08.2020)

24. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. 3-е изд. М.: Техносфера, 2012. 834 с.

25. Dechter R., Pearl J. Generalized Best-First Search Strategies and the Optimality of A* // J. of the ACM (JACM). 1985. Vol. 32, № 3. P. 505–536. URL: <https://www.ics.uci.edu/~dechter/publications/r0.pdf> (дата обращения 29.08.2020)

26. Carvana Image Masking Challenge. URL: <https://www.kaggle.com/c/carvana-image-masking-challenge> (дата обращения 29.08.2020)

27. Vehicle Key-Point & Orientation Estimation. URL: https://github.com/Pirazh/Vehicle_Key_Point_Orientation_Estimation (дата обращения 29.08.2020)

28. Flusser J. On the Independence of Rotation Moment Invariants // Pattern Recognition. 2000. Vol. 33, iss. 9. P. 1405–1410. doi: 10.1016/S0031-3203(99)00127-2

29. A Dual-Path Model with Adaptive Attention for Vehicle Re-Identification / P. Khorramshahi, A. Kumar, N. Peri,

S. S. Rambhatla, J.-C. Chen, R. Chellappa. P. 6132–6141. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_ICCV_2019/papers/Khorramshahi_A_Dual-Path_Model_With_Adaptive_Attention_for_Vehicle_Re-Identification_ICCV_2019_paper.pdf (дата обращения 29.08.2020)

Информация об авторах

Зубов Илья Геннадьевич – магистр техники и технологий (2016), программист-алгоритмист компании ООО "НЕКСТ". Автор 11 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка изображений; машинное обучение; видеоаналитика и прикладные телевизионные системы.

Адрес: ООО "НЕКСТ", Пресненская наб., д. 12, этаж 35, пом. № 3, Москва, 123317, Россия

E-mail: ZubovIG@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0407-5651>

Обухова Наталия Александровна – доктор технических наук (2009), профессор (2004), заведующая кафедрой телевидения и видеотехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 130 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка изображений; машинное обучение; видеоаналитика и прикладные телевизионные системы.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

E-mail: natalia172419@yandex.ru

References

1. Dagan E., Mano O., Stein G. P., Shashua A. Forward Collision Warning with a Single Camera. Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symp., Parma, Italy, 14–17 Jun. 2004. Piscataway, IEEE, 2004, pp. 37–42. doi: 10.1109/IVS.2004.1336352

2. Complex of video recording of traffic violations "ISKRA-VIDEO-2" KR. Available at: http://www.simicon.ru/rus/product/gun/archive/iv2_k.html (accessed 29.08.2020)

3. Chen K., Wang J., Pang J., Cao Y., Xiong Y., Li X., Sun S., Feng W., Liu Z., Xu J., Zhang Z., Cheng D., Zhu C., Cheng T., Zhao Q., Li B., Lu X., Zhu R., Wu Y., Dai J., Wang J., Shi J., Ouyang W., Loy C. C., Lin D. MMDetection: open MMLab detection Toolbox and Benchmark. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1906.07155.pdf> (accessed 29.08.2020)

4. Liu W., Anguelov D., Erhan D., Szegedy C., Reed S., Fu C.-Y., Berg A. C. SSD: Single Shot MultiBox Detector. Europ. Conf. on Computer Vision, ECCV 2016, Amsterdam, The Netherlands, 8–16 Oct. 2016. doi: 10.1007/978-3-319-46448-0_2. P. 21–37

5. Lin T.-Y., Goyal P., Girshick R., He K., Dollar P. Focal loss for dense object detection. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2018, vol. PAMI-42, iss. 2, pp. 318–327.

6. Li B., Liu Y., Wang X. Gradient Harmonized Single-stage Detector. Thirty-Third AAAI Conf. on Artificial Intelligence, AAAI-19, Jan. 27 – Feb. 1, 2019, pp. 8577–8584.

7. Tian Z., Shen C., Chen H., He T. FCOS: Fully Convolutional One-Stage Object Detection. 2019. Available at: <https://arxiv.org/abs/1904.01355> (accessed 29.08.2020)

8. He K., Gkioxari G., Dollar P., Girshick R. Mask R-CNN. IEEE Intern. Conf. on Computer Vision, ICCV 2017, Venice,

Italy, Oct. 22–29, 2017. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1703.06870.pdf> (accessed 29.08.2020)

9. Bochkovskiy A., Wang C.-Y., Mark Liao H.-Y. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2004.10934.pdf> (accessed 21.02.2021)

10. Hoedlmoser M., Micusik B., Liu M.-Y., Pollefeys M., Kampel M. Classification and Pose Estimation of Vehicles in Videos by 3D Modeling within Discrete-Continuous Optimization. 2nd Intern. Conf. on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT), Zurich, Switzerland, 13–15 Oct. 2012. Piscataway, IEEE, 2012, pp. 198–205. doi: 10.1109/3DIMPVT.2012.23

11. Xiang Y., Choi W., Lin Y., Savarese S. Subcategory-aware Convolutional Neural Networks for Object Proposals and Detection, 2017. Available at: <https://arxiv.org/abs/1604.04693>. (accessed 02.06.2020)

12. Mousavian A., Anguelov D., Flynn J., Kosecka J. 3D Bounding Box Estimation using Deep Learning and Geometry. 2017. Available at: <https://arxiv.org/abs/1612.00496> (accessed 02.06.2020)

13. Chen X., Kundu K., Zhang Z., Ma H., Fidler S., Urtasun R. Monocular 3D Object Detection for Autonomous Driving. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2016, Las Vegas, USA, Jun. 27–30, 2016. Piscataway, IEEE, 2016, pp. 2147–2156.

14. Pavlakos G., Zhou X., Chan A., Derpanis K. G., Daniilidis K. 6-DoF Object Pose from Semantic Keypoints. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Singapore, 29 May – 3 June, 2017. Piscataway, IEEE, 2017, pp. 2011–2018. doi: 10.1109/ICRA.2017.7989233

15. Zubov I. G. Vehicle Pose Estimation Based on Object Contour. IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ELCONRUS 2020, St Petersburg and Moscow, 27–30 Jan. 2020. Piscataway, IEEE, 2020, pp. 1452–1454. doi: 10.1109/ElConRus49466.2020.9039472
16. The PASCAL Visual Object Classes Challenge (VOC2007). Available at: <http://www.pascal-network.org/challenges/VOC/voc2007/index.html> (accessed 01.06.2020)
17. Deng J., Dong W., Socher R., Li L.-J., Li K., Fei-Fei L. ImageNet: A Large-Scale Hierarchical Image Database. Computer Vision and Pattern Recognition 2009, CVPR 2009, Miami, USA, Jun. 20–25, 2009, pp. 248–255. doi: 10.1109/CVPR.2009.5206848
18. Lin T.-Y., Maire M., Belongie S., Bourdev L., Girshick R., Hays J., Perona P., Ramanan D., Zitnick C. L., Dollar P. Microsoft COCO: Common Objects in Context. Europ. Conf. on Computer Vision. ECCV 2014, Zurich, Switzerland, Sept. 6–12, 2014, pp. 740–755. doi: 10.1007/978-3-319-10602-1_48
19. Zeiler M. D., Fergus R. Visualizing and Understanding Convolutional Networks. Proc. of the ECCV Europ. Conf. on Computer Vision, Zurich, Switzerland, 6–12 Sept. 2014. Piscataway, IEEE, 2014, pp. 818–833. doi: 10.1007/978-3-319-10590-1_53
20. Zubov I. G. An Automatic Method for Interest Point Detection. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 6, pp. 6–16. doi: <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-6-6-16> (In Russ.)
21. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2016, Las Vegas, USA, Jun. 27–30, 2016. Piscataway, IEEE, 2016, pp. 770–778. doi: 10.1109/CVPR.2016.90
22. Zubov I. G. Method for Automatic Segmentation of Vehicles in Digital Images. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 5, pp. 6–16. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-6-16 (In Russ.)
23. Shcherba E. V. Application Analysis of Interpolation and Extrapolation Methods as Used for Image Restoration. Computer Optics. 2009, vol. 33, no. 3, pp. 336–339. Available at: <http://www.computeroptics.smr.ru/KO/PDF/KO33-3/33313.pdf> (accessed 20.08.2020). (In Russ.)
24. Gonzalez R., Woods R. Digital Image Processing. 3^d ed. Prentice Hall, 2012, 834 p. (In Russ.)
25. Dechter R., Pearl J. Generalized Best-First Search Strategies and the Optimality of A*. J. of the ACM (JACM). 1985, vol. 32, no. 3, pp. 505–536. Available at: <https://www.ics.uci.edu/~dechter/publications/r0.pdf> (accessed 29.08.2020)
26. Carvana Image Masking Challenge. Available at: <https://www.kaggle.com/c/carvana-image-masking-challenge> (accessed 29.08.2020)
27. Vehicle Key-Point & Orientation Estimation. Available at: https://github.com/Pirazh/Vehicle_Key_Point_Orientation_Estimation (accessed 29.08.2020)
28. Flusser J. On the Independence of Rotation Moment Invariants. Pattern Recognition. 2000, vol. 33, iss. 9, pp. 1405–1410. doi: 10.1016/S0031-3203(99)00127-2
29. Khorramshahi P., Kumar A., Peri N., Rambhatla S. S., Chen J.-C., Chellappa R. A Dual-Path Model with Adaptive Attention for Vehicle Re-Identification. pp. 6132–6141. Available at: https://openaccess.thecvf.com/content_ICCV_2019/papers/Khorramshahi_A_Dual-Path_Model_With_Adaptive_Attention_for_Vehicle_Re-Identification_ICCV_2019_paper.pdf (accessed 29.08.2020)

Information about the authors

Ilya G. Zubov, Master of Engineering and Technology (2016), Ltd "Next" algorithm programmer. The author of 11 scientific publications. Area of expertise: digital image processing; applied television systems.
Address: Ltd "Next", 12, Presnenskaya Nab., floor 35, room № 3, Moscow 123317, Russia
E-mail: ZubovIG@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0407-5651>

Natalia A. Obukhova, Dr. of Sci. (Engineering) (2009), Professor (2004), the Chief of the Department of Television and Video Equipment of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 130 scientific publications. Area of expertise: digital image processing; applied television systems.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia
E-mail: natalia172419@yandex.ru

Радиолокация и радионавигация

УДК 621.396.96

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-60-71>

Характеристики точности параметрического метода Берга при пространственной обработке сигналов в линейной неэквидистантной антенной решетке

В. М. Кутузов¹, М. А. Овчинников¹✉, Е. А. Виноградов²

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

² Левенский католический университет, Левен, Бельгия

✉ mixovchinnikov@list.ru

Аннотация

Введение. При неэквидистантном (НЭ) расположении антенных элементов (АЭ) приемной антенной решетки (АР) в диаграмме направленности (ДН) возникают боковые лепестки (БЛ), уровень которых может существенно превышать приемлемый для практики. При невысоких отношениях сигнал/шум (ОСШ) это приводит к появлению аномальных ошибок при измерении угловых координат источников сигналов, что ухудшает статистические характеристики точности (ХТ) оценивания их угловых параметров. Является актуальным построение ХТ оценивания угловых координат модифицированного параметрического метода Берга (МБ) в приложении к задаче пространственной обработки отраженных сигналов в транспортируемой декаметровой (ДКМ) радиолокационной станции (РЛС) с неэквидистантной антенной решеткой (НЭАР) при расположении АЭ на прямой линии.

Цель работы. Анализ статистических ХТ оценивания угловых координат объектов при использовании модифицированного МБ для пространственной обработки отраженных сигналов в декаметровой РЛС с линейной НЭАР, АЭ которой расположены со случайным шагом в пределах от $\lambda/2$ до нескольких λ , где λ – рабочая длина волны несущего колебания.

Материалы и методы. При построении статистических ХТ использовалось компьютерное моделирование в среде MatLab, достоверность которого подтверждалась построением известных ХТ классических методов на основе дискретного преобразования Фурье, а также сопоставлением полученных ХТ с асимптотическими границами, в том числе границами Крамера–Рао.

Результаты. Показана возможность и определены условия применения модифицированного параметрического МБ в задаче оценивания азимутальных координат отраженных радиолокационных сигналов при НЭ расположении АЭ приемной АР загоризонтной ДКМ РЛС. Получены статистические ХТ и проведено их сравнение с асимптотически оптимальными ХТ максимально правдоподобных оценок, соответствующих эквидистантному расположению АЭ.

Заключение. Полученные результаты доказали субоптимальность модифицированного МБ для обработки сигналов в НЭАР при случайном шаге расположения АЭ в пределах от $\lambda/2$ до 2λ , что позволяет рекомендовать его для применения в транспортируемых ДКМ РЛС.

Ключевые слова: декаметровые РЛС, неэквидистантная антенная решетка, параметрические методы, пространственная обработка сигналов, диаграмма направленности, спектр пространственных частот, характеристики точности

Для цитирования: Кутузов В. М., Овчинников М. А., Виноградов Е. А. Характеристики точности параметрического метода Берга при пространственной обработке сигналов в линейной неэквидистантной антенной решетке // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 3. С. 60–71. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-60-71

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 31.03.2021; принята к публикации после рецензирования 27.04.2021; опубликована онлайн 29.06.2021

Accuracy Characteristics of the Parametric Burg Method for Spatial Signal Processing in a Nonuniform Array Antenna

Vladimir M. Kutuzov¹, Mihail A. Ovchinnikov^{1✉}, Evgenij A. Vinogradov²

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²KU Leuven, Leuven, Belgium

✉ mixovchinnikov@list.ru

Abstract

Introduction. In the case of a nonuniform (NU) design of the antenna elements (AEs) of the receiving antenna array (AA), the antenna pattern (AP) features sidelobes (SL) with a significantly higher noise level than acceptable values. Under low signal-to-noise ratios (SNR), this noise leads to angular coordinate measuring errors thus worsening the statistical accuracy characteristics (ACs) of the signal. It is of relevance to construct the ACs of angular coordinates when a modified parametric Burg method (BM) is applied to spatial reflected signal processing in a transportable decametre range radar (DRR) with a nonuniform array (NUA) and linear accuracy characteristics.

Aim. To analyse the statistical ACs of angular coordinate objects when using a modified BM for spatial reflected signal processing in a DRR with a linear NUA, in which AEs are located with a random step in the range from $\lambda/2$ to several λ , where λ is the operating carrier wavelength.

Materials and methods. Statistical ACs were constructed by computer modelling in the MatLab software, the reliability of which was confirmed by conventional discrete Fourier transform methods, as well as by comparing the obtained ACs with asymptotic bounds, including Cramer–Rao bounds.

Results. The possibility and conditions of using a modified parametric BM for estimating the azimuthal coordinates of reflected radar signals were determined for the case of a nonuniform design of the over-the-horizon DRR receiving AA AEs. Statistical ACs were obtained and compared with the asymptotically optimal ACs of the maximum likelihood estimations corresponding to the uniform AE design.

Conclusion. The obtained results confirm the suboptimality of the BM modified for signal processing in the NUA at a random AE spacing step in the range from $\lambda/2$ to 2λ , making it applicable for use in transportable DRRs.

Keywords: decametre range radar, nonuniform array antenna, parametric methods, spatial signal processing, antenna pattern, spatial frequency spectrum, accuracy characteristics

For citation: Kutuzov V. M., Ovchinnikov M. A., Vinogradov E. A. Accuracy Characteristics of the Parametric Burg Method for Spatial Signal Processing in a Nonuniform Array Antenna. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 3, pp. 60–71. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-60-71

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

Submitted 31.03.2021; accepted 27.04.2021; published online 29.06.2021

Введение. Необходимость неэквидистантного расположения АЭ в приемных АР загоризонтных ДКМ РЛС может быть вызвана различными факторами [1, 2]. Чаще всего это естественный береговой ландшафт в месте расположения АЭ транспортируемых радиолокационных средств [3–5] либо геометрические особенности корпуса, надстройки и палубное оборудование корабля или иного носителя радиолокатора [6]. Иногда, при ограничении количества АЭ и соответствующих им каналов приема, используют разреженные НЭАР, стремясь сохранить или увеличить геометрические размеры апертуры и тем самым сохранить или уменьшить ши-

рину главного луча ДН [7, 8]. Примеры подобных НЭАР со случайным расположением АЭ описаны в [9–11]. Естественно, при синтезе НЭАР снижение заполняемости апертуры АР приводит к росту БЛ ДН, поскольку нарушаются условия дискретизации теоремы отсчетов В. А. Котельникова. Особенно явно это проявляется для малоэлементных НЭАР с изотропными в угломерной плоскости АЭ: так, в равноамплитудной АР при числе АЭ $M = 16$ интерференционные БЛ достигают уровня -3 дБ [12]. В статье [13], продолжением которой является настоящее исследование, показано, что в НЭАР с $M = 16$ и случайным расположением АЭ

Характеристики точности параметрического метода Берга при пространственной
обработке сигналов в линейной неэквидистантной антенной решетке
Accuracy Characteristics of the Parametric Burg Method for Spatial
Signal Processing in a Nonuniform Array Antenna

нецелесообразно применять традиционную согласованную обработку пространственных сигналов из-за образования интерференционных БЛ повышенного уровня, часто соизмеримого с уровнем главного лепестка ДН (около -5 дБ). В сложной и нестационарной помеховой обстановке, характерной для ДКМ РЛС [3, 5], это может приводить к аномальным ошибкам измерения азимутальных координат целей [14–16].

В ряде работ предложены и исследованы алгоритмы обработки сигналов в квазиконформных НЭАР, учитывающих ограничения естественного ландшафта [17, 18]. В частности, предлагается разбивать апертуру АР на отдельные сегменты разной длины и размещать их неэквидистантно в соответствии с геометрией береговой черты, в том числе по-разному ориентируя отдельные сегменты [19, 20]. Для объединения сигналов сегментов и формирования результирующей ДН используются нетрадиционные параметрические методы с высоким угловым разрешением, модифицированные для многосегментной обработки [17, 21]. Однако в пределах сегментов АЭ должны располагаться эквидистантно, что снижает оперативность и удобство развертывания АР транспортируемых ДКМ РЛС и в конечном счете ограничивает потенциально возможные показатели качества их применения, к которым относятся характеристики точности измерений и разрешающая способность по азимуту.

В статье [13], предшествующей данным исследованиям, авторами разработан метод обработки сигналов в M -элементной линейной НЭАР, основанный на искусственном восстановлении эквидистантного пространственного сигнала. Это достигается применением обратного преобразования Фурье к ДН, полученной на основе исходного НЭ-сигнала и имеющей, как правило, БЛ неприемлемо высокого уровня. Обратное дискретное преобразование Фурье (ДПФ) от ДН НЭАР может быть с достаточной точностью представлено с эквидистантной дискретизацией восстановленного пространственного сигнала, что позволяет применять для получения ДН методы, предполагающие эквидистантные отсчеты данных, в том числе нетрадиционные параметрические методы обработки сигналов [22–24]. В статье исследуется применение параметрического метода Берга (МБ) для

обработки восстановленных эквидистантных сигналов виртуальной эквидистантной АР. Выбор в качестве объекта исследований рекуррентного МБ обусловлен тем, что этот алгоритм хорошо изучен и доступен в таких стандартных приложениях, как MatLab, является субоптимальным в задаче обнаружения и измерения параметров сигналов при небольших длинах выборки ($M \leq 128$) [23], компактен с точки зрения вычислительных затрат [24], что является значимым преимуществом при обработке локационных сигналов в реальном масштабе времени. Кроме того, достоинством МБ, как и других методов на основе авторегрессионных моделей, является высокое статистическое разрешение – обнаружение при приеме двух и более сигналов, существенно превышающее стандартный рэлеевский предел традиционного ДПФ [5]. Напомним, что в основе МБ лежат авторегрессионные модели с конечным числом варьируемых параметров, представляющие собой в случае дискретного представления сигналов разностные уравнения авторегрессии [22].

Цель исследований, описываемых в данной статье, – построение и анализ статистических характеристик точности (ХТ) оценивания угловых координат целей при использовании модифицированного МБ для пространственной обработки отраженных сигналов в ДКМ РЛС с линейной НЭАР, АЭ которой расположены со случайным шагом d , равномерно распределенным в пределах от $\lambda/2$ до нескольких λ , где λ – рабочая длина волны несущего колебания. ХТ оценивания азимутальных координат целей относятся к основным показателям качества (тактико-техническим характеристикам) ДКМ РЛС. В качестве базы для сравнительного анализа МБ выбраны ХТ эквидистантной АР с шагом $d = \lambda/2$ и тем же количеством АЭ M . В этом случае пространственное ДПФ как функция пространственных частот, определяемых во многих работах [5, 6, 8, 13] как $U = (2\pi d/\lambda)\sin\theta = \pi\sin\theta$, где θ – азимутальный угол, является несмещенной асимптотически оптимальной оценкой максимального правдоподобия, асимптотическим пределом для которой служат известные границы Крамера–Рао [25]. Кроме того, полученные ХТ модифицированного МБ сравниваются с ХТ при согласованной с расположением АЭ обработке сигналов в НЭАР.

Формулировка задачи. Рассмотрим M -элементную линейную АР, состоящую из ненаправленных в горизонтальной плоскости АЭ и описанную в [13] (рис. 1). Случайный шаг АР d_m будем считать равномерно распределенным на интервале от $\lambda/2$ до $i\lambda/2$ ($i > 1$). Очевидно, что среднее значение шага НЭАР $d_{\text{ср}} = (i+1)\lambda/4$, а соответствующий ему средний размер апертуры $A_{\text{ср}} = (M-1)(i+1)\lambda/4$, что увеличивает апертуру в $(i+1)/2$ раз. Это неизбежно приведет к сужению главного лепестка ДН обратно пропорционально увеличению апертуры НЭАР и появлению увеличенных интерференционных БЛ в традиционной ДН. Пример модуля ДН для НЭАР с $M = 16$ и $i = 4$ приведен на рис. 2 сплошной линией. Сужение главного лепестка ДН не является недостатком НЭАР, а вот нерегулируемый рост БЛ приводит к негативным последствиям: возрастает вероятность аномальных ошибок при оценивании азимутальных координат целей и вероятность обнаружения ложных целей, что ухудшает тактико-технические характеристики РЛС в целом.

В качестве альтернативного метода обработки сигналов в НЭАР в [13] предложено использовать искусственно восстановленный с помощью обратного ДПФ сигнал виртуальной эквидистантной АР с последующим применением параметрического МБ. Основанный на моделях авторегрессии [17], в эквидистантном варианте МБ обладает высокой точностью и разрешающей способностью по оцениваемым параметрам [21–24], в качестве которого в данном случае рассматривается пространственная частота U . Основной задачей исследований в данной статье является качественный и количественный сравнительный анализ ХТ оценивания угловых координат целей модифицированного МБ, который позволит сделать выводы о его применимости в ДКМ РЛС.

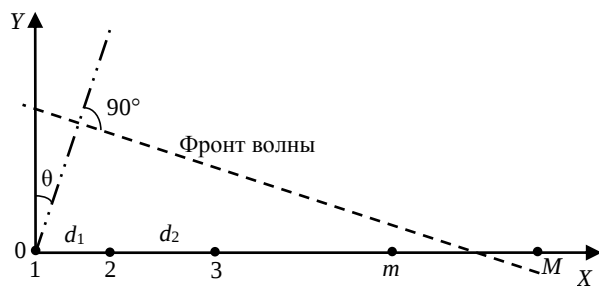


Рис. 1. Геометрические соотношения НЭАР

Fig. 1. Geometric relations of NUA

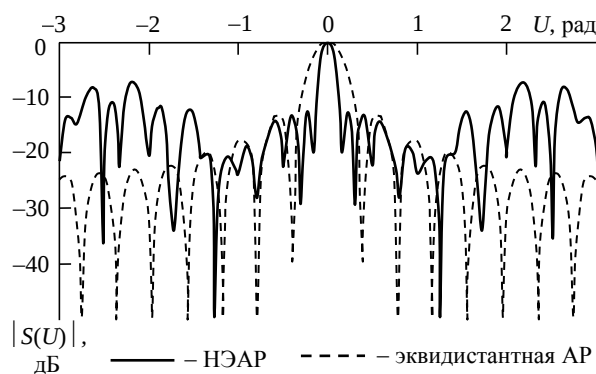


Рис. 2. Характеристики направленности НЭАР

Fig. 2. Directional characteristics of NUA

В загоризонтных ДКМ РЛС цели, отражающие зондирующие сигналы, находятся в дальней зоне антенного устройства, что позволяет считать фронт падающей волны плоским. Кроме того, зондирующие сигналы ДКМ РЛС являются узкополосными, не превышающими в силу большой загрузки коротковолнового диапазона нескольких десятков килогерц, что ограничивает разрешающую способность по дальности единицами километров [1]. При размерах апертуры НЭАР транспортируемой ДКМ РЛС в несколько сотен метров это позволяет анализировать и выполнять раздельно и в любой последовательности временную и пространственную составляющие когерентной обработки сигналов [13]. Невысокое разрешение по радиальной и продольной дальности, характерное для загоризонтных ДКМ РЛС, позволяет рассматривать воздушные и надводные цели как пространственно сосредоточенные или условно точечные, чьи линейные размеры существенно меньше геометрических размеров поверхностного элемента разрешения [3, 5].

При анализе ХТ оценивания угловых координат в плоскости азимутальных углов θ будем считать АЭ слабонаправленными, что соответствует практике построения приемных АР в ДКМ-радиолокации [1, 3]. В этом случае направленные свойства АР будут в основном определяться множителем решетки [2], а АЭ с достаточной степенью точности можно считать изотропными в азимутальной плоскости. Тогда в передней полуплоскости для азимутальных углов $\theta = \pm 90^\circ$ множитель решетки будет соответствовать ДН АР.

В качестве переменной при построении ДН рассматриваемой НЭАР удобней использовать нормированную к стандартному шагу $d = \lambda/2$ про-

пространственную или угловую частоту U , определяемую в передней полуплоскости азимутальных углов $\theta \in [-\pi/2; \pi/2]$ как

$$U = \pi \sin \theta; U \in [-\pi; \pi], \quad (1)$$

что обеспечивает однозначную взаимосвязь переменных U и θ в передней полуплоскости. Заметим, что ДН АР $S(U)$ в этом случае можно трактовать как оценку спектра пространственных частот [26].

Для всех анализируемых в статье методов оценку угловой частоты цели $\hat{U}_ц$ будем определять по положению абсолютного максимума ДН $S(U)$ на оси пространственных частот U :

$$U = \hat{U}_ц, \text{ если } S(\hat{U}_ц) = \max_U \{S(U)\}. \quad (2)$$

Для получения оценки азимута цели $\hat{\theta}_ц$ необходимо выполнить обратное преобразование на основе (1): $\hat{\theta}_ц = \arcsin(\hat{U}_ц/\pi)$, где $\hat{\theta}_ц \in [-\pi/2; \pi/2]$.

Под ХТ будем понимать зависимость от входного ОСШ $\sigma_{вх}^2$ дисперсии ошибки оценивания пространственной частоты $\sigma_U^2 = |U_ц - \hat{U}_ц|^2$ дискретного сигнала АР $V_ц(m)$, отраженного одиночной точечной целью с пространственной частотой $U_ц$, при воздействии комплексного нормального некоррелированного по каналам приема аддитивного шума $e(m)$ с нулевым средним значением. Поскольку оценки спектра пространственных частот как на основе ДПФ $S_{ДПФ}(U)$, так и на основе МБ $S_{МБ}(U)$ являются несмещенными при воздействии одиночного сигнала $V_ц(m)$, такое определение ХТ является достаточным для сравнительного анализа точности угловых измерений в АР [16].

Основные соотношения. Пусть на АР поступает аддитивная смесь полезного сигнала $V_ц(m)$ и шума $e(m)$:

$$y(m) = V_ц(m) + e(m); m = 1, 2, \dots, M, \quad (3)$$

где полезный сигнал после выполнения частотно-временной составляющей обработки по задержке и доплеровскому сдвигу частоты имеет вид

$$V_ц(m) = A_0 e^{j[x(m)U_ц + \varphi_0]}. \quad (4)$$

Здесь A_0 – фиксированная амплитуда сигнала; $x(m)$ – нормированная к шагу $d = \lambda/2$ координата m -го АЭ по оси X (рис. 1); φ_0 – случайная начальная фаза, равномерно распределенная на интервале $[-\pi; \pi]$. С целью упрощения последующих выкладок в дальнейшем положим в (4) $A_0 = 1$.

Согласованная пространственная обработка сигнала (3), оптимальная в случае одиночной цели, примет вид пространственного ДПФ [13]:

$$\begin{aligned} S_{ДПФ}(U) &= \sum_{m=1}^M y(m) V^*(m) = \\ &= \sum_{m=1}^M y(m) e^{-jx(m)U}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $V^*(m) = e^{-jx(m)U}$ – комплексно-сопряженная копия полезного сигнала вида (4) с единичной амплитудой, отличающаяся несущественным фазовым множителем $e^{j\varphi_0}$. Если в (5) положить $e(m) = 0$ для всех m , то для эквидистантной АР с шагом $d = \lambda/2$ получим известное выражение для ДН АР

$$\begin{aligned} S_{ДПФ}(U) &= M \frac{\sin[M(U - U_ц)/2]}{\sin[(U - U_ц)/2]} \approx \\ &\approx M \frac{\sin[M(U - U_ц)/2]}{(U - U_ц)/2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Модуль ДН вида (6) для эквидистантной АР с $M = 16$ показан на рис. 2 штрихами. Как видно из сравнения с модулем ДН НЭАР, представленным там же сплошной линией, максимальные интерференционные БЛ выросли до уровня более -6.5 дБ.

По-прежнему пренебрегая аддитивным шумом $e(m)$ в (5), ДН для НЭАР со случайным шагом d_m будет определяться как

$$S_{НЭ}(U) = \sum_{m=1}^M e^{-jx(m)[U - U_ц]}. \quad (7)$$

Выражение (7) по сути является преобразованием Фурье от НЭ сигнала (4) с единичной амплитудой. Дальнейшие действия в соответствии с алгоритмом, разработанным в [13], предполагают выполнение обратного ДПФ от $S_{НЭ}(U)$ вида (7), в результате которого получается восстановленный дискретный пространственный сигнал с эквидистантными отсчетами $\tilde{y}(m)$, $m = 1, 2, \dots, L$,

который можно соотнести с некой виртуальной эквидистантной АР. Очевидно, что при случайном шаге $d_m \geq \lambda/2$ размерность виртуальной АР $L > M$.

В силу обратимости прямого и обратного преобразований Фурье повторное преобразование Фурье от $\tilde{y}(m)$ даст практически тот же результат, что и (5):

$$S_{\text{ДПФ}}(U) \approx \sum_{m=1}^L \tilde{y}(m) \tilde{V}^*(m) = \\ = \sum_{m=1}^L \tilde{y}(m) e^{-j(m-1)U},$$

где $\tilde{V}^*(m) = e^{-jx(m)U} = e^{-j(m-1)U}$ ($m=1, 2, \dots, L$), как и в (5), – комплексно-сопряженная копия виртуального эквидистантного опорного сигнала. Знак приближенного равенства обусловлен нецелым числом полувольт, приходящихся на апертуру НЭАР, в отличие от апертуры виртуальной эквидистантной АР, которая при обратном ДПФ всегда кратна целому числу полувольт. В связи с этим реальная апертура, как правило, незначительно превышает виртуальную:

$$M \sum_{m=1}^{M-1} d_m - (L-1)(\lambda/2) \leq \lambda/2,$$

но это отличие несущественно при $M \gg \lambda/2$. В частности, при $M = 16$ и равномерном распределении шага НЭАР в пределах $d_m \in [\lambda/2; 2\lambda]$ отклонение ДН виртуальной АР в области БЛ не превышает 3 % [13].

Дальнейшие шаги модернизированного алгоритма пространственной обработки предполагают замену традиционного ДПФ на параметрический алгоритм Берга, в основе которого лежит использование авторегрессионной модели конечного порядка K для описания виртуального дискретного сигнала $\tilde{y}(m)$ [24]:

$$\tilde{y}(m) = - \sum_{k=1}^K a_k \tilde{y}(m-k), \quad (8)$$

где a_k – параметры авторегрессионной модели, определяемые в общем случае решением известной системы уравнений Юла–Уолкера [22], в основе которой лежит оценка автокорреляционной матрицы сигнала $\tilde{y}(m)$ при $m \in [1; L]$. В качестве

критерия при нахождении параметров a_k используется минимизация суммарной мощности ошибки предсказания, составляющие которой определяются для каждого отсчета m как

$$p_m = \frac{1}{L-K} \sum_{m=1}^{L-K} |\tilde{y}(m) - \hat{y}(m)|^2, \quad (9)$$

где предсказанное значение сигнала $\hat{y}(m)$ находится на основании (8):

$$\hat{y}(m) = - \sum_{k=1}^K a_k \tilde{y}(m-k). \quad (10)$$

В рекуррентном варианте МБ [21] для повышения надежности оценок спектральной плотности мощности используется предсказание виртуального сигнала (10) как "вперед", так и "назад", что обеспечивается простой заменой m на $(L-m)$ и комплексным сопряжением параметров авторегрессионной модели a_k^* .

По найденным параметрам a_k , где $k \in [1; K]$, можно построить оценку спектральной плотности мощности (СПМ) по методу Берга $|S_B(U)|^2$ в базисе нормированных пространственных частот U вида (1):

$$|S_B(U)|^2 = \frac{P_K}{\left| 1 + \sum_{k=1}^K a_k \exp\{-jUk\} \right|^2}, \quad (11)$$

где P_K – суммарная мощность ошибки предсказания, полученная на основе (9) и (10) для модели порядка K при предсказании в прямом и обратном направлениях (убывания и нарастания дискретной переменной m).

При построении ХТ моделировалось нормальное падение на НЭАР единичного пространственно сосредоточенного сигнала с плоским фронтом и фиксированной амплитудой. Пространственная обработка на основе модифицированного метода Берга выполнялась на фоне нормального пространственно некоррелированного комплексного шума с нулевым средним и равными дисперсиями реальной и мнимой составляющих: $\sigma_{\text{Re}}^2(m) = \sigma_{\text{Im}}^2(m) = \sigma_{\text{ш}}^2 = \text{const}$ для всех m . Тогда мощность входного шума в каждом канале приема $P_{\text{ш}} = 2\sigma_{\text{ш}}^2$, а входное ОСШ по мощ-

ности при единичной амплитуде полезного сигнала $q_{\text{ВХ}}^2 = 1 / (2\sigma_{\text{Ш}}^2)$.

В соответствии с (2) оценку пространственной частоты полезного сигнала $\hat{U}_{\text{Ц}}$ определим как абсолютный максимум СПМ вида (11). Для получения оценки дисперсии ошибки измерения частоты полезного сигнала $\hat{\sigma}_{\hat{U}}^2$ в каждой точке ХТ при фиксированном значении ОСШ $q_{\text{ВХ}}^2$ использовалось компьютерное статистическое моделирование работы модифицированного МБ и стандартный пакет MatLab. При N -кратном повторе однотипных экспериментов с независимыми реализациями шума $e(m)$ оценка дисперсии ошибки измерения пространственной частоты примет вид

$$\hat{\sigma}_{\hat{U}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |U_{\text{Ц}} - \hat{U}_{\text{Ц}}(n)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\hat{U}_{\text{Ц}}(n)|^2; \quad U_{\text{Ц}} = 0; \quad q_{\text{ВХ}}^2 = \text{const}, \quad (12)$$

что соответствует нормальному падению полезного сигнала на линию апертуры АР.

Для M -элементной эквидистантной линейной АР с шагом $d = \lambda/2$ нахождение абсолютного максимума ДН, полученной на основании ДПФ, соответствует асимптотически оптимальной оценке максимального правдоподобия (МП). В этом случае известный предел Крамера–Рао для дисперсии оценки частотного параметра имеет вид [27]

$$\sigma_{\text{КР}}^2 = \frac{6}{q_{\text{ВХ}}^2 M (M^2 - 1)}. \quad (13)$$

Аналогичный асимптотический предел теоретически получен для параметрических алгоритмов, основанных на моделях авторегрессии (МА) [27]. При анализе комплексных данных для порядков модели авторегрессии K асимптотический предел имеет вид

$$\sigma_{\text{МА}}^2 = \frac{1}{q_{\text{ВХ}}^2 K (M - K)^2}. \quad (14)$$

Из (13) и (14) непосредственно следует, что асимптотический предел для МА минимален при $K = M/3$ и превышает предел Крамера–Рао не более, чем на 0.5 дБ. Это позволяет рассматри-

вать методы, основанные на МА, как асимптотически субоптимальные в задачах измерения пространственной частоты сигналов. Выражение (14) можно использовать как асимптотический предел и для МБ, однако при рекуррентном алгоритме расчета параметров модели авторегрессии a_k реальные ХТ рекуррентного МБ не всегда достигают расчетных асимптот [26].

Основные результаты. Анализ ХТ модифицированного МБ для НЭАР проводился для трех вариантов равномерного распределения случайного шага расположения АЭ: слабой неэквидистантности при $d_m \in [\lambda/2; \lambda]$, средней неэквидистантности при $d_m \in [\lambda/2; 2\lambda]$ и сильной неэквидистантности при $d_m \in [\lambda/2; 3\lambda]$. На рис. 3 представлены ХТ в виде зависимости оценок дисперсии ошибки измерения пространственной частоты $\hat{\sigma}_{\hat{U}}^2$ от входного ОСШ $q_{\text{ВХ}}^2$ для эквидистантной АР с шагом $d = \lambda/2$ (рис. 3, а) и НЭАР со случайным равномерно распределенным шагом d : от $\lambda/2$ до λ (рис. 3, б); от $\lambda/2$ до 2λ (рис. 3, в); от $\lambda/2$ до 3λ (рис. 3, г). ХТ модифицированного МБ строились методом статистического моделирования при $N = 10^4$ в соответствии с (12) для порядков авторегрессионной модели $K = 2$ (пунктир), $K = 4$ (штрихпунктир) и $K = 6$ (сплошная линия). Штриховой линией на всех рисунках приведены ХТ асимптотически оптимальной оценки МП, с которой сопоставлялись ХТ модифицированного МБ. Теми же линиями, что и ХТ АР, на рис. 3 приведены асимптотические пределы, вычисленные по (13) и (14). При этом асимптотические пределы для ХТ МБ в случае НЭАР вычислялись по (14) при увеличенном числе АЭ виртуальной АР $L > M$, поэтому на рис. 3, б–г они оказываются ниже асимптотических пределов Крамера–Рао, вычисленных для эквидистантного случая при $M = 16$.

Как видно из приведенных на рис. 3 графиков, у всех ХТ выделяются 3 области: область аномальных ошибок, соответствующая низким значениям ОСШ, область асимптотического приближения к нижним границам, соответствующая высоким значениям ОСШ, и находящаяся между ними переходная область, или область отсечки [27]. Поскольку модифицированный МБ предполагается

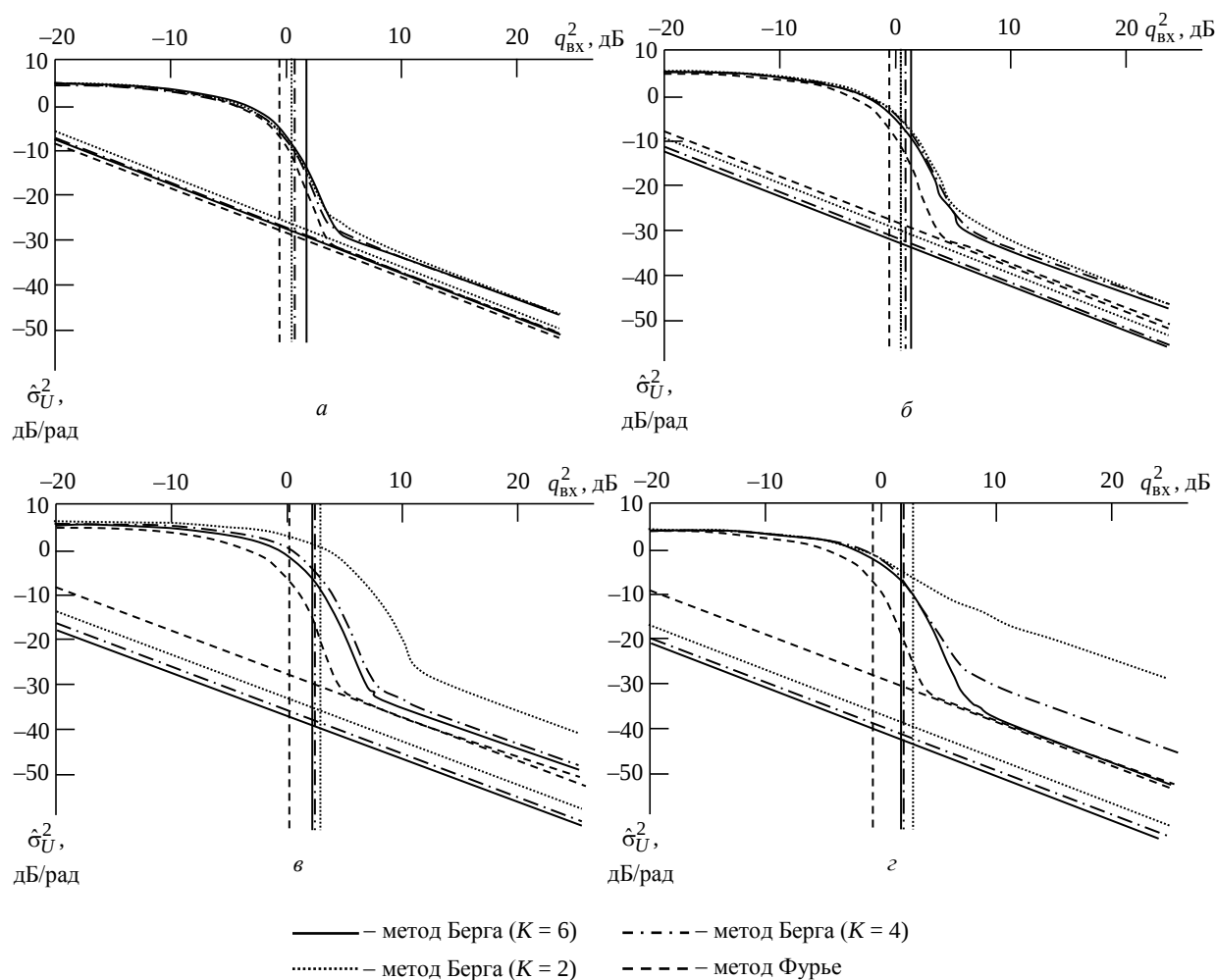


Рис. 3. Характеристики точности АР:

a – эквидистантная АР; $б$ – НЭАР, шаг d от $\lambda/2$ до λ ;

$в$ – НЭАР, шаг d от $\lambda/2$ до 2λ ; $г$ – НЭАР, шаг d от $\lambda/2$ до 3λ

Fig. 3. Accuracy characteristics of the AAs:

a – uniform AA; $б$ – NUA, step d from $\lambda/2$ to λ ;

$в$ – NUA, step d from $\lambda/2$ to 2λ ; $г$ – NUA, step d from $\lambda/2$ to 3λ

использовать в ДКМ РЛС как совместный алгоритм обнаружения и оценивания, то интервал рабочих значений ОСШ q_{BX}^2 для ХТ может быть выбран исходя из требуемых минимальных (пороговых) значений вероятности правильного обнаружения D на основе характеристик обнаружения, полученных в [13]. Для рассматриваемой НЭАР с числом АЭ $M = 16$ при $D \geq 0.8$ это соответствует $q_{\text{BX}}^2 > 3$ дБ для случайного шага $d_m \in [\lambda/2; \lambda]$ при порядке модели $K \geq 4$, $q_{\text{BX}}^2 > 4$ дБ для $d_m \in [\lambda/2; 2\lambda]$ при $K \geq 4$ и $q_{\text{BX}}^2 > 5$ дБ для $d_m \in [\lambda/2; 3\lambda]$ при $K = 6$. Для наглядности на рис. 3 вертикальными линиями того же вида, что

и сами ХТ, приведены значения ОСШ q_{BX}^2 , соответствующие вероятности правильного обнаружения $D = 0.8$.

Сопоставление ХТ модифицированного МБ, полученных для НЭАР со слабой (рис. 3, б), средней (рис. 3, в) и сильной (рис. 3, г) разреженностями, и ХТ оценок МП, полученных на основе ДПФ для эквидистантной АР, показывает, что с увеличением разреженности НЭАР ХТ МБ сдвигаются вправо, в область больших значений ОСШ. При этом ХТ МБ при низких порядках модели становятся неудовлетворительными, в первую очередь, за счет увеличения области отсечки и утраты свойства асимптотического приближения. В то же время, при оптимальном порядке модели авторе-

грессии $K \approx M/3$ проигрыш во входном ОСШ для области отсечки и области асимптотического приближения не превышает 3 дБ. Более того, ХТ сильно разреженной НЭАР (см. рис. 3, з) асимптотически приближаются к границам, полученным для ХТ МП при эквидистантном расположении АЭ в АР. Это позволяет рассматривать модифицированный МБ как асимптотически субоптимальный алгоритм оценивания пространственных частот в НЭАР. Следует отметить, что асимптотические границы вида (14), вычисленные для виртуальной АР с числом АЭ $L > M$, не достигаются реальными ХТ модифицированного МБ.

Выводы. Показана возможность субоптимального оценивания пространственных частот в НЭАР со случайным шагом расположения АЭ в пределах от $\lambda/2$ до нескольких λ за счет искусственного восстановления (синтезирования) сигнала виртуальной эквидистантной АР и последующего использования синтезированного эквидистантного сигнала в качестве входного для рекуррентного МБ, основанного на авторегрессионных моделях с конечным числом варьируемых параметров.

Для НЭАР со слабой, средней и сильной разреженностями получены ХТ и оценены потери во входном ОСШ по сравнению с ХТ асимптотически оптимальных оценок МП, построенными для эквидистантного расположения АЭ приемной АР. Полученные результаты позволяют считать модифицированный МБ асимптотически субоптимальным в задаче оценивания пространственных частот отраженных сигналов приемной НЭАР транспортируемой ДКМ РЛС. Как показало статистическое моделирование, точность измерения угловых параметров МБ возрастает с ростом порядка модели и максимально приближается к пределу Крамера–Рао при $K = M/3$.

Разработанный и исследованный в статье модифицированный МБ можно рекомендовать как самостоятельный алгоритм совместного обнаружения и оценивания пространственных частот отраженных сигналов при случайных вариациях шага НЭАР в пределах от $\lambda/2$ до 3λ , что приемлемо для оперативно развертываемых транспортируемых ДКМ РЛС поверхностных волн.

Список литературы

1. 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.
2. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справочник / Я. Д. Ширман, Ю. И. Лосев, Н. Н. Минервин и др.; под ред. Я. Д. Ширмана. М.: ЗАО "МАКВИС", 1998. 828 с.
3. Алебастров В. А., Гойхман Э. Ш., Заморин И. М. Основы загоризонтной радиолокации / под ред. А. А. Колосова. М.: Радио и связь, 1984. 256 с.
4. Dzvонkovskaya A., Gurgel K.-W. Future Contribution of HF Radar WERA to Tsunami Early Warning Systems // *Europ. J. of Navigation*. 2009. Vol. 7, № 2. Р. 1–7.
5. Основы проектирования многопозиционных декаметровых РЛС пространственной волны / В. М. Кутузов, А. В. Бархатов, А. В. Безуглов и др.; под общ. ред. В. М. Кутузова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2012. 191 с.
6. Адаптивные радиотехнические системы с антенными решетками / А. К. Журавлев, В. А. Хлебников, А. П. Родимов и др.; под ред. Т. Ф. Шпагина. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1991. 544 с.
7. Справочник по радиолокации: в 2 кн. Кн. 1 / под ред. М. И. Скольника; пер. с англ. под ред. В. С. Вербы. М.: Техносфера, 2015. 671 с.
8. Караваев В. В., Сазонов В. В. Статистическая теория пассивной локации. М.: Радио и связь, 1987. 240 с.
9. Орошук И. М., Сучков А. Н., Василенко А. М. Мониторинг состояния морской поверхности корреля-

ционным пространственным фильтром декаметрового диапазона // *Горный инф. анал. бюл. Науч.-техн. журн. (спец. вып.)*. 2014. № S12-3. С. 77–87.

10. Орошук И. М., Сучков А. Н. Возможности применения нелинейных цифровых антенных решеток в декаметровом диапазоне // *Вестн. инженерной школы ДВФУ*. 2015. № 2 (23). С. 17–26.

11. Эйбус А., Анпилогов В. Неэквидистантная антенная решетка с низким уровнем боковых лепестков. URL: <http://lib.tsonline.ru/articles2/sputnik/neekvidistantnaya-antennaya-reshetka-s-nizkim-urovнем-bokovyh-lepestkov> (дата обращения 16.03.2021)

12. Федосеева Е. В., Тарасов А. А. Исследование метода синтеза неэквидистантной равноамплитудной антенной решетки // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2011. № 3. С. 4–8.

13. Кутузов В. М., Овчинников М. А., Виноградов Е. А. Характеристики обнаружения параметрического метода обработки сигналов в неэквидистантной антенной решетке транспортируемой декаметровой радиолокационной станции // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*. 2020. Т. 23, № 6. С. 43–58. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-43-58

14. Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.

15. Фалькович С. Е., Пономарев В. И., Шкварко Ю. В. Оптимальный прием пространственно-временных сигналов в радиоканалах с рассеянием / под ред. С. Е. Фальковича. М.: Радио и связь, 1989. 293 с.

16. Трифонов А. П., Шинаков Ю. С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь, 1986. Вып. 26. 264 с.
17. Кутузов В. М. Авторегрессионная обработка сигналов в квазиконформных кусочно-непрерывных антенных решетках // Изв. вузов. Электроника. 2001. № 4. С. 93–100.
18. Kutuzov V. M. Space-Time Data Processing with Breaks Based on the Parametric Models // Proc. Intern. Radar Symp. IRS-2004., Poland / Warsaw University of Technology. Warszawa, 19–21 May 2004. P. 391–399.
19. Кутузов В. М., Сотников А. А. Модельно-параметрические технологии обработки данных с разрывами // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2005. № 2. С. 3–10.
20. Kutuzov V. M., Sotnikov A. A. Model-Parametrical Spatial Signals Processing Use in Radar with Mechanical Scanning Antenna // Proc. Intern. Radar Symp. IRS-2005, Berlin, Germany, 6–8 Sept. 2005 / German Institute of Navigation. Berlin, 2005. P. 589–592.
21. Хайкин С. О., Карри Б. У., Кеслер С.Б. Спектральный анализ радиолокационных мешающих отражений методом максимальной энтропии // ТИИЭР. 1982. Т. 70, № 9. С. 51–62.
22. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / пер. с англ. О. И. Хабарова. М.: Мир, 1990. 584 с.
23. Kay S. M. Modern Spectral Estimation. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1988. 543 p.
24. Haykin S. O. Adaptive Filter Theory / 4th ed. Upper Saddle River. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 2002. 936 p.
25. Горбунов Ю. Н., Лобанов Б. С., Куликов Г. В. Введение в стохастическую радиолокацию. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 376 с.
26. Кутузов В. М., Мазуров К. А. Многосегментный авторегрессионный алгоритм обработки сложномодулированных сигналов. Характеристики точности // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2012. № 3. С. 53–59.
27. Lang S. W., McClellan J. M. Frequency estimation with maximum entropy spectral estimators // IEEE Transactions on acoustics, speech and signal processing. 1980. Vol. 28, iss. 6. P. 716–724. doi: 10.1109/TASSP.1980.1163467

Информация об авторах

Кутузов Владимир Михайлович – доктор технических наук (1997), профессор, заведующий кафедрой радиотехнических систем, президент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 270 научных и учебно-методических публикаций в отечественных и зарубежных изданиях, в том числе двух монографий, 12 авторских свидетельств и патентов. Сфера научных интересов – радиолокация.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

E-mail: vmkutuzov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3438-1361>

Овчинников Михаил Александрович – магистр по направлению "Радиотехника" (2019), аспирант кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 5 научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокация.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

E-mail: mixovchinnikov@list.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0814-5370>

Виноградов Евгений Алексеевич – доктор технических наук (2017), научный сотрудник кафедры электротехники факультета инженерно-технических наук Левенского католического университета Бельгии (KU Leuven). Автор более 20 научных публикаций в международных журналах и на конференциях. Сфера научных интересов – моделирование распространения радиоволн, многоантенные системы, а также средства обнаружения и связи с беспилотными летательными аппаратами.

Адрес: Левенский католический университет, Левен, Замковый парк Аренберг, 10, 3001, Бельгия

Email: evgenii.vinogradov@kuleuven.be

<https://orcid.org/0000-0002-4156-0317>

References

1. Skolnik M. I. Radar Handbook, Third Edition. Ed. 2. tr. from eng. V. S. Verbi. M., *Tehnosfera*, 2015, 680 p. (In Russ.)
2. Shirman Ja. D., Losev Ju. I., Minervin N. N., Moskvina S. V., Gorshkov S. A., Lihovitskij D. I., Levchenko L. S. *Radioelektronnye sistemy: osnovy postroeniya i teorija. Spravochnik* [Radioelectronic systems: foundations of construction and theory. Directory]. M., ZAO "MAKVIS", 1998, 828 p. (In Russ.)
3. Alebastrov V. A., Gojzman Je. Sh., Zamorin I. M. *Osnovy zagorizontnoj radiolokacii* [The basics of over-the-horizon radar]. M., *Radio i svjaz'*, 1984, 257 p. (In Russ.)
4. Dzvonkovskaya A., Gurgel K.-W. Future Contribution of HF Radar WERA to Tsunami Early Warning Systems. *Eur. J. of Navigation*. Aug., 2009, vol. 7, no. 2, pp. 1–7.
5. Kutuzov V. M., Barhatov A. V., Bezuglov A. V., Verem'ev V. I., Konovalov A. A. *Osnovy proektirovaniya mnogopozicionnykh dekametrovykh RLS prostranstvennoj volny* [Design fundamentals for multi-position decimeter skywave radars]. SPb, Izd-vo SPbGETU "LETI", 2012, 191 p. (In Russ.)
6. Zhuravlev A. K., Hlebnikov V. A., Radimov A. P. *Adaptivnye radiotekhnicheskie sistemy s antennymi reshetkami* [Adaptive radio systems with antenna arrays]. L.: *Izd-vo Leningradskogo universiteta*, 1991, 544 p. (In Russ.)
7. Skolnik M. I. Radar Handbook, Third Edition. Ed. 1. tr. from eng. V. S. Verbi. M., *Tehnosfera*, 2015, 671 p. (In Russ.)
8. Karavaev V. V., Sazonov V. V. *Statisticheskaja teorija passivnoj lokacii* [Statistical theory of passive location]. M., *Radio i svjaz'*, 1987, 240 p. (In Russ.)
9. Oroshhuk I. M., Suchkov A. N., Vasilenko A. M. Monitoring of the sea surface correlation spatial filter decimeter range. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). Selected articles (special issue). 2014, iss. S12-3, pp. 77–87. (In Russ.)
10. Oroshhuk I. M., Suchkov A. N. Possibilities of using nonlinear digital antenna arrays in the decimeter range. *Vest. inzhenernoj shkoly DVFU* [FEFU Engineering School Bulletin]. 2015, no. 2 (23), pp. 17–26. (In Russ.)
11. Eyduš A., Anpilogov V. A non-equidistant antenna array with a low level of side lobes. Available at: <http://lib.tssonline.ru/articles2/sputnik/neekvidistantnaya-antennaya-reshetka-s-nizkim-urovнем-bokovyh-lepestkov> (accessed 16.03.2021) (In Russ.)
12. Fedoseeva E. V., Tarasov A. A. Research of a method of synthesis unequally spaced and with identical amplitude antenna array. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy* [Radio engineering and telecommunication systems]. 2011, no. 3, pp. 4–8. (In Russ.)
13. Kutuzov V. M., Ovchinnikov M. A., Vinogradov E. A. Detection Characteristics of the Parametric Method of Signal Processing in a Sparse Antenna Array of a Transportable Decimeter Range Radar. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2020, vol. 23, no. 6, pp. 43–58. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-43-58 (In Russ.)
14. Chernjak V. S. *Mnogopozicionnaja radiolokacija* [Multiposition radar]. M., *Radio i svjaz'*, 1993, 416 p. (In Russ.)
15. Fal'kovich S. E., Ponomarev V. I., Shkvarko Yu. V. *Optimal'nyj priem prostranstvenno-vremennykh signalov v radiokanalakh s rassejaniem* [Optimal reception of space-time signals in radio channels with scattering]. Ed. S. E. Fal'kovich. M., *Radio i svjaz'*, 1989, 296 p. (In Russ.)
16. Trifonov A. P., Shinakov Ju. S. *Sovmestnoe razlicenie signalov i ocenka ih parametrov na fone pomeh* [Joint discrimination of signals and assessment of their parameters against the background of interference]. M., *Radio i svjaz'*, 1986, vol. 26, 264 p. (In Russ.)
17. Kutuzov V. M. Autoregressive signal processing in quasiconformal piecewise continuous antenna arrays. *J. of the Russian Universities. Electronics*, 2001, no. 4, pp. 93–100. (In Russ.)
18. Kutuzov V. M. Space-Time Data Processing with Breaks Based on the Parametric Models. *Proc. Internat. Radar Symp. IRS-2004*, 19–21 May 2004, Warszawa, Poland. Warsaw University of Technology. P. 391–399.
19. Kutuzov V. M., Sotnikov A. A. Model-parametric technologies of discontinuous data processing. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2005, no. 2, pp. 3–10 (In Russ.)
20. Kutuzov V. M., Sotnikov A. A. Model-Parametrical Spatial Signals Processing Use in Radar with Mechanical Scanning Antenna. *Proc. Intern. Radar Symp. IRS-2005*, Berlin, Germany, 6–8 Sept., 2005. German Institute of Navigation, 2005, pp. 589–592.
21. Hajkin S. O., Karri B. U., Kesler S. B. Maximum Entropy Spectral Analysis of Radar Clutter. *TIER*. 1982, vol. 70, no. 9, pp. 51–62 (In Russ.)
22. Marple Jr. S. L. Digital spectral analysis: with applications. Ed. O. I. Habarov. M., *Mir*, 1990, 584 p. (In Russ.)
23. Kay S. M. Modern Spectral Estimation. New Jersey, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1987, 543 p.
24. Haykin S. O. Adaptive Filter Theory. 4th ed. Upper Saddle River. New Jersey, Prentice-Hall, Inc., 2002, 936 p.
25. Gorbunov Ju. N., Lobanov B. S., Kulikov G. V. *Vvedenie v stohasticheskiju radiolokaciju* [An introduction to stochastic radar]. M., *Gorjachaja linija – Telekom*, 2015, 376 p. (In Russ.)
26. Kutuzov V. M., Mazurov K. A. Multi-segment autoregressive algorithm of complex modulated signals processing: accuracy characteristics. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2012, no. 3, pp. 53–59 (In Russ.)
27. Lang S. W., McClellan J. M. Frequency estimation with maximum entropy spectral estimators. *IEEE Transactions on acoustics, speech and signal processing*. 1980, vol. 28, iss. 6, pp. 716–724. doi: 10.1109/TASSP.1980.1163467

Information about the authors

Vladimir M. Kutuzov, Dr. Sci (Eng.) (1997), Professor, Head of the Department of Radio Engineering Systems, President of the Saint Petersburg Electrotechnical University. Authored more than 270 scientific and educational publications in Russian and foreign magazines, including 2 monographs, 12 author's certificates and patents. Area of expertise: radiolocation.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: vmkutuzov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3438-1361>

Mihail A. Ovchinnikov, Master in Specialty "Radio Engineering" (2019, Saint Petersburg Electrotechnical University), postgraduate student of the Department of Radio Engineering Systems in Saint Petersburg Electrotechnical University, authored of 5 scientific publications. Area of expertise: radiolocation.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: mixovchinnikov@list.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0814-5370>

Evgenij A. Vinogradov, Dr. Sci (Eng.) (2017), research associate of electrical engineering department (ESAT) at KU Leuven (Belgium). His doctoral research interests focused on multidimensional radio propagation channel modeling. He has authored over 20 publications in major academic journals and conferences. Area of expertise: MIMO systems, wireless communications with UAVs, UAV detection.

Address: KU Leuven, 10 Kasteelpark Arenberg, 3001 Leuven, Belgium

Email: evgenii.vinogradov@kuleuven.be

<https://orcid.org/0000-0002-4156-0317>

Радиолокация и радионавигация

УДК 621.396.969

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-72-80>

Определение пространственной разрешающей способности на радиолокационных изображениях при дистанционном зондировании Земли

С. Н. Гусев , С. В. Журавлев, А. В. Попов

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

 vka@mil.ru

Аннотация

Введение. Анализ современного состояния и перспектив совершенствования средств радиолокационного наблюдения космического базирования позволяет определить задачи, которые могут решаться этими средствами в глобальной аэрокосмической информационной системе, обеспечивающей мониторинг воздушного и космического пространства, а также земной поверхности. Получаемая информация может использоваться для анализа результатов хозяйственной деятельности, экологического состояния окружающей среды, поиска полезных ископаемых, мониторинга чрезвычайных ситуаций, обнаружения и распознавания заданных объектов на море и суше, а также для обеспечения национальной безопасности. В связи с этим часто возникает необходимость использовать методы предварительной аналитической оценки разрешающей возможности для вновь разрабатываемых высокоточных бортовых радиолокационных комплексов, предназначенных для установки на космических аппаратах, с учетом их основных технических характеристик, параметров движения космического аппарата и влияния состояния атмосферы. Для априорного определения значений пространственной разрешающей способности требуется разработать методику расчета значений соответствующих показателей, которые должны удовлетворять требуемому качеству получаемых радиолокационных изображений после их синтеза.

Цель работы. Создание математических зависимостей и логических правил, позволяющих производить специальные расчеты для априорного оценивания пространственной разрешающей способности радиолокационных изображений, планируемых к получению с помощью бортовой аппаратуры радиолокационного комплекса.

Материалы и методы. Используются аналитические методы определения оценки погрешности разрешающей способности бортовых радиолокационных комплексов с синтезированной апертурой в боковом (азимутальном) направлении и по дальности, а также теория обработки радиолокационных сигналов.

Результаты. Практические эксперименты по оценке разрешающей способности, проведенные на действующем радиолокационном комплексе, с целью сравнения с данными, полученными аналитическим путем, подтвердили правильность расчетов на основе предложенной методики. С помощью разработанной методики определены порядок и содержание расчета погрешности оценки разрешающей способности в азимутальном направлении и по дальности.

Заключение. Представленная методика позволяет целенаправленно конструировать новые или проводить сравнительный анализ существующих радиолокационных комплексов, в зависимости от требований по разрешающей способности.

Ключевые слова: радиолокационный комплекс, геолокация, дистанционное зондирование, сканирование поверхности, радиолокационное изображение, высокоточная информация, разрешающая способность, погрешность оценки

Для цитирования: Гусев С. Н., Журавлев С. В., Попов А. В. Определение пространственной разрешающей способности на радиолокационных изображениях при дистанционном зондировании Земли // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 3. С. 72–80. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-72-80

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 05.04.2021; принята к публикации после рецензирования 29.04.2021; опубликована онлайн 29.06.2021

Determination of the Spatial Resolution of Radar Images in Remote Sensing of the Earth

Sergey N. Gusev , Sergey V. Zhuravlev, Anatolij V. Popov

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St Petersburg, Russia

 vka@mil.ru

Abstract

Introduction. The analysis of the current state and prospects of space-based radar surveillance tools is important for determining their functions in global aerospace information systems, which aim to monitor air and space, as well as the Earth's surface. Radar surveillance information is used for the purposes of economic analysis, environmental monitoring, mineral search, emergency monitoring, detection and recognition of specified objects at sea and on land, as well as for ensuring national security. In this regard, it is of relevance to develop methods for preliminary assessment of the resolution capacity of novel high-precision onboard radar systems installed on a spacecraft, considering their main technical characteristics, the parameters of the spacecraft movement and the influence of the atmosphere. A priori estimation of spatial resolution values requires a method for calculating the corresponding indicators meeting the required quality of the synthesized radio holograms.

Aim. To derive mathematical dependencies and logical rules allowing a priori estimation of the spatial resolution of radar images obtained by the onboard equipment of a radar complex.

Materials and methods. Analytical methods were used to determine the resolution error of onboard radar systems with a synthesized aperture in the lateral (azimuthal) direction and range, as well as the theory of radar signal processing.

Results. A comparison of the experimental and analytical data on the resolution capacity of an actual radar system confirmed the validity on the proposed method. The developed methodology was used to determine the procedure of calculating the error when estimating the resolution capacity in terms of azimuth and range.

Conclusion. The proposed method can be used for both designing novel radar systems and comparing existing radar complexes, depending on the resolution requirements.

Keywords: radar complex, geolocation, remote sensing, surface scanning, radar image, high-precision information, resolution, estimation error

For citation: Gusev S. N., Zhuravlev S. V., Popov A. V. Determination of the Spatial Resolution of Radar Images in Remote Sensing of the Earth. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 3, pp. 72–80. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-72-80

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

Submitted 05.04.2021; accepted 29.04.2021; published online 29.06.2021

Введение. Дистанционное зондирование поверхности Земли (ДЗЗ) с применением различных бесконтактных способов получения информации осуществляется с различных носителей, к которым следует в первую очередь отнести летательные и космические аппараты (КА). Наиболее перспективным способом получения высокодетальной информации об объектах природного или искусственного происхождения, расположенных на земной поверхности, является использование радиолокационного сканирования заданного участка поверхности. Полученные данные могут быть полезны в различных областях деятельности: карто-

графии, геодезии, глобального экологического мониторинга, в чрезвычайных ситуациях при поиске и идентификации различных объектов на больших территориях, а также при решении отдельных задач в интересах обороны страны.

Перед разработкой или применением высокодетального радиолокационного комплекса (ВРЛК) целесообразно провести предварительные оценки пространственной разрешающей способности радиолокационных изображений (РЛИ), которые планируется получать с его помощью, с учетом влияния на разрешающую способность ВРЛК параметров атмосферы.

Определение пространственной разрешающей способности на радиолокационных изображениях при дистанционном зондировании Земли
Determination of the Spatial Resolution of Radar Images in Remote Sensing of the Earth

Под пространственной разрешающей способностью (разрешение на местности, разрешение пространственное) понимается характеристика качества РЛИ, которая определяет размер наименьшего объекта отражающей поверхности, который может быть отделен от окружающих его объектов, отличающихся по интенсивности (радиояркости) на величину, не меньшую радиометрического разрешения. Значения параметров объектов оценивания носят стохастический характер.

При определении пространственной разрешающей способности необходимо учесть особенности функционирования ВРЛК, основу конструкции которого составляет радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА) [1], размещенный на КА, находящемся на околоземной орбите.

Одно из основных свойств РЛС с РСА – постоянство линейной разрешающей способности на сформированном изображении в боковом (азимутальном) направлении, при этом угловая разрешающая способность в указанном направлении непостоянна для различных дальностей. Поэтому при оценивании разрешающей способности РЛИ определяются два основных параметра изображения: разрешающая способность в азимутальном направлении Δx и разрешающая способность по дальности Δr .

Определение априорной оценки этих параметров выполнено расчетным методом с учетом отдельных особенностей функционирования ВРЛК.

Методы. При разработке алгоритмов расчета разрешающей способности выбрана модель радиолокационного наблюдения земной поверхности ВРЛК в визирной системе координат, геометрическое представление которой отображено на рис. 1, где обозначены: A – точка прицеливания; Q – точка надира; H – высота орбиты КА – носителя ВРЛК; R – наклонная дальность до объекта съемки, отсчитываемая от фазового центра антенны РСА; L – горизонтальная дальность от точки надира до центра объекта съемки по поверхности Земли; v_a – скорость следа луча активной фазированной антенной решетки (АФАР) на поверхности Земли; v_o – орбитальная скорость КА; θ_y – ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) в угломестной плоскости; β_B – угол визирования; γ – угол скольжения, измеряемый в угломестной плоскости между линией визирования луча АФАР OA и касательной линией; η – угол падения; $\pm\Delta\beta$ – сектор углов электронного сканирования в угломестной плоскости.

Начало визирной системы координат совпадает с фазовым центром АФАР (точка O). Ось OX_B параллельна направлению вектора скорости КА v_o в гринвичской системе координат. Ось OZ_B направлена по нормали к плоскости АФАР в сторону излучения сигнала. Оси OX_B и OY_B лежат

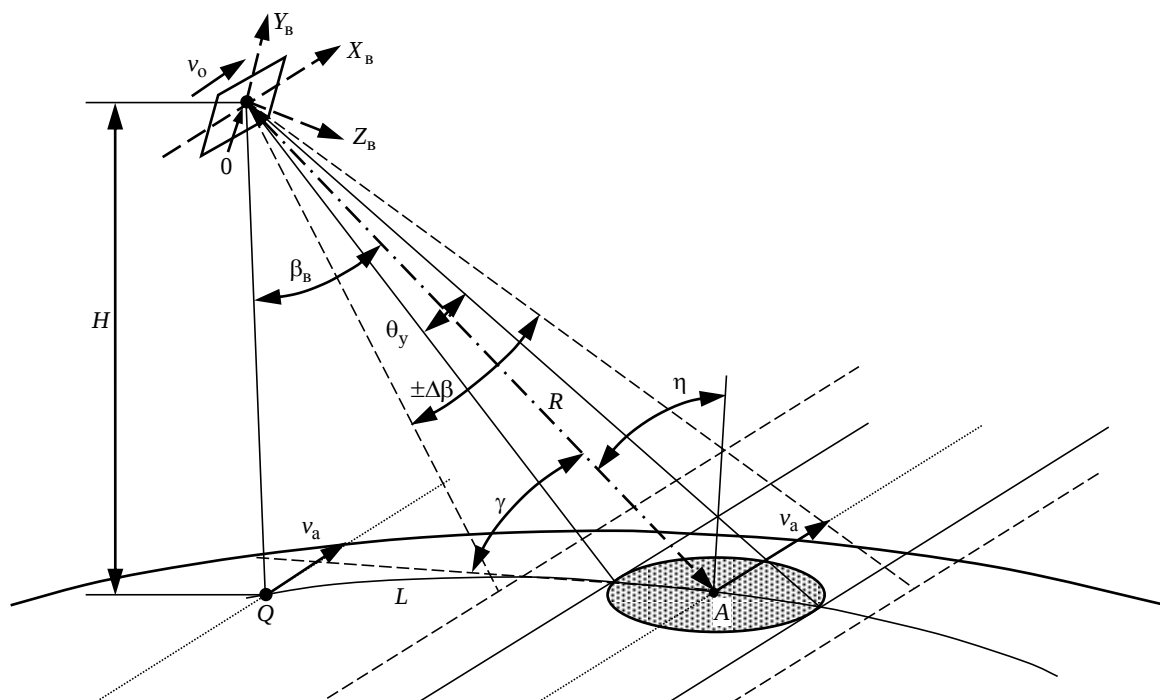


Рис. 1. Общая схема радиолокационной съемки в визирной системе координат

Fig. 1. A general scheme of radar shooting in the sighting coordinate system

в плоскости АФАР. Ось OY_B дополняет систему координат АФАР до правой. Плоскость OAQ является плоскостью визирования.

В начале съемки объект A наблюдается под углом β_B к линии проекции ВРЛК на поверхность Земли. В течение съемки этот угол может изменяться в пределах сектора сканирования $\pm\Delta\beta$.

Разработанная модель позволяет в результате расчетов определить для объекта зондирования априорные оценки разрешающих способностей в азимутальном направлении Δx и по дальности Δr .

Оценки представлены в виде результатов расчетов в числовом виде.

Специфика создания метода расчета априорной оценки пространственной разрешающей способности заключается в определении функциональной зависимости между искомыми величинами и исходными данными (моделью движения носителя РСА, геометрией съемки, режимом и параметрами съемки, параметрами зондирующего сигнала, параметрами Земли). Таким образом, расчет погрешностей оценок $\xi[\Delta x]$ и $\xi[\Delta r]$ сводится к задаче вычисления погрешностей косвенных измерений.

При создании метода расчета использовались общепринятые апробированные теоретические положения и математические методы, описывающие принципы построения и функционирования РСА с общепринятой структурой космического базирования [1–3].

Алгоритм расчета оценок геометрических параметров радиолокационных изображений состоит в следующем.

1. Определение коэффициента сферичности [5]:

$$k_{\text{сф}} = \frac{R_3 + H}{R_3 \cos \alpha},$$

где R_3 – средний радиус Земли; α – центральный угол (рис. 2, Ц – центр Земли).

2. Определение коэффициента расширения импульса $k_{\text{вес}}$, связанного с применением взвешивающих фильтров в тракте обработки радиолокационных данных. Типовые применяемые весовые функции и соответствующие значения коэффициентов расширения импульса приведены в табл. 1 [6].

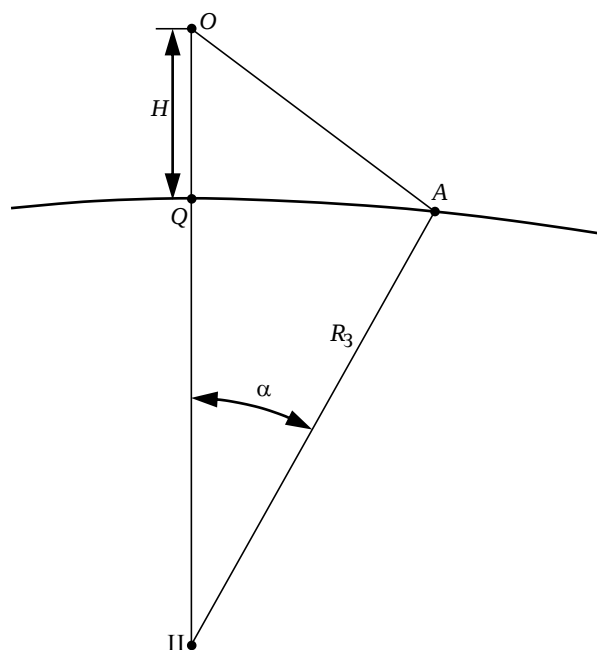


Рис. 2. Определение коэффициента сферичности
Fig. 2. Determination of the sphericity coefficient

Табл. 1. Значения коэффициента расширения импульса $k_{\text{вес}}$
Table 1. Values of the pulse expansion coefficient $k_{\text{вес}}$

Типовые весовые функции	$k_{\text{вес}}$
Без учета взвешивающих фильтров	1.00
Дольфа–Чебышева	1.35
Хемминга	1.47
Косинус в квадрате	1.62
Косинус в кубе	1.87

3. Определение коэффициента тропосферной погрешности [5]:

$$k_{\text{тр}} = 1 + 0.002277 \times \frac{\left[p_{\text{атм}} + (1235/T + 0.05)e - \text{tg}^2(\beta_B + 0.5\theta_y) \right]}{R_d(\beta_B + 0.5\theta_y) \cos(\beta_B + 0.5\theta_y)},$$

где $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление; T – температура атмосферы в точке проведения съемки; e – давление водяных паров; R_d – наклонная дальность, рассчитываемая от фазового центра антенны РСА до дальней границы полосы обзора как функция от параметров β_B и θ_y .

4. Определение угла падения с использованием выражения [5]

$$\eta = \arcsin \left(\frac{R_3 + H}{R_3} \sin \beta_B \right).$$

5. Определение разрешающей способности по дальности. Для сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [7, 8] она проводится в соответствии с выражением [3–6]

$$\Delta r = \frac{k_{\text{вс}} c}{2\Delta F \sin(\eta - 0.5\theta_y)}, \quad (1)$$

где c – скорость света; ΔF – девиация частоты ЛЧМ-сигнала.

Для сигнала с фазокодовой модуляцией (ФКМ) [5]

$$\Delta r = \frac{k_{\text{вс}} c}{2\Delta F_T \sin(\eta - 0.5\theta_y)}, \quad (2)$$

где F_T – тактовая частота ФКМ-сигнала.

6. Расчет коэффициента ухудшения разрешающей способности $k_{\text{парц}}$ (для режима обзорной съемки и режима наблюдения морских объектов [9, 10]), обусловленного уменьшением времени синтеза апертуры при реализации режимов несколькими парциальными лучами, в соответствии с выражением [5]

$$k_{\text{парц}} = 1 + \frac{K_R^I - 1}{K_R - 1},$$

где $K_R = \frac{\sum_{i=2}^n R_i}{R_{i-1}}$ – коэффициент, учитывающий увеличение наклонной дальности при переходе от i -й к $(i+1)$ -й парциальной полосе обзора; I – количество парциальных полос; R_i – наклонная дальность, рассчитываемая от фазового центра антенны РСА до центра i -й парциальной полосы.

7. Расчет разрешающей способности в азимутальном направлении проводится в соответствии с выражениями:

– для детального и маршрутного режимов [5]:

$$\Delta x = \frac{\lambda R_i (\beta_B + 0.5\theta_y)}{2k_{\text{сф}} v_o t_H k_{\text{тр}}}, \quad (3)$$

где λ – длина волны зондирующего сигнала; v_o – орбитальная скорость КА – носителя ВРЛК; t_H – время синтезирования;

– для режимов обзорной съемки и наблюдения объектов на водной и равнинной поверхностях [3, 5]:

$$\Delta x = \frac{\lambda R (\beta_B + 0.5\theta_y) k_{\text{парц}}}{2k_{\text{сф}} v_o t_H k_{\text{тр}}}. \quad (4)$$

8. Из (1) и (2) определяются производные по параметрам $\Delta F_{\text{эф}}$ или ΔF_T , η , θ_y и $k_{\text{вс}}$:

$$\begin{aligned} K_{r1} &= \frac{\partial(\Delta r)}{\partial(\Delta f)} = -\frac{ck_{\text{вс}}}{\Delta f^2 \sin(\eta - 0.5\theta_y)}; \\ K_{r2} &= \frac{\partial(\Delta r)}{\partial\eta} = \frac{ck_{\text{вс}} \cos(\eta - 0.5\theta_y)}{2\Delta f \sin^2(\eta - 0.5\theta_y)}; \\ K_{r3} &= \frac{\partial(\Delta r)}{\partial(\theta_y)} = -\frac{ck_{\text{вс}} \cos(\eta - 0.5\theta_y)}{4\Delta f \sin^2(\eta - 0.5\theta_y)}; \\ K_{r4} &= \frac{\partial(\Delta r)}{\partial k_{\text{вс}}} = \frac{c}{2\Delta f \sin(\eta - 0.5\theta_y)}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Delta f = \Delta F_{\text{эф}}$ – для ЛЧМ-сигнала; $\Delta f = \Delta F_T$ – для сигнала с фазокодовой модуляцией.

9. Используя (5) и учитывая взаимную независимость ошибок определения параметров, получим формулу для вычисления суммарной погрешности разрешающей способности по дальности [5]:

$$\xi[\Delta r] = \left[K_{r1}^2 \xi^2(\Delta f) + K_{r2}^2 \xi^2(\eta) + K_{r3}^2 \xi^2(\theta_y) + K_{r4}^2 \xi^2(k_{\text{вс}}) \right]^{0.5},$$

где $\xi(*)$ – погрешность определения параметра "**".

10. Из (3) и (4) определяются частные производные [11] по параметрам λ , R , v_o и t_H :

$$\begin{aligned} K_{x1} &= \frac{\partial(\Delta x)}{\partial\lambda} = -\frac{R(\beta_B + 0.5\theta_y)}{2k_{\text{сф}} v_o t_H k_{\text{тр}}}; \\ K_{x2} &= \frac{\partial(\Delta x)}{\partial R} = -\frac{\lambda}{2k_{\text{сф}} v_o t_H k_{\text{тр}}}; \\ K_{x3} &= \frac{\partial(\Delta x)}{\partial v_o} = -\frac{\lambda R (\beta_B + 0.5\theta_y)}{2k_{\text{сф}} v_o^2 t_H k_{\text{тр}}}; \\ K_{x4} &= \frac{\partial(\Delta x)}{\partial t_H} = -\frac{\lambda R (\beta_B + 0.5\theta_y)}{2k_{\text{сф}} v_o t_H^2 k_{\text{тр}}}. \end{aligned} \quad (6)$$

11. Используя (6), получим формулы для вычисления суммарной погрешности разрешающей способности в азимутальном направлении [5]:

– для режима детальной и маршрутной съемки:

$$\xi[\Delta x] = \left[K_{x1}^2 \xi^2(\lambda) + K_{x2}^2 \xi^2(R) + K_{x3}^2 \xi^2(v_o) + K_{x4}^2 \xi^2(t_H) \right]^{0.5};$$

– для режима обзорной съемки и режима наблюдения морских объектов:

$$\xi[\Delta x] = K_R \left[K_{x1}^2 \xi^2(\lambda) + K_{x2}^2 \xi^2(R) + K_{x3}^2 \xi^2(v_o) + K_{x4}^2 \xi^2(t_H) \right]^{0.5}.$$

Апробирование представленной методики произведено при репрезентативном наборе физически реализуемых данных с верификацией результатов по соответствующим показателям существующих систем. Далее приведен пример расчетов (априорной) оценки разрешающих способностей по дальности и в азимутальном направлении по предлагаемой методике.

Исходные данные для расчета [12–15]:

- тип зондирующего сигнала – ЛЧМ;
- длина волны РСА $\lambda = 0.03$ м;
- девиация частоты – $\Delta f = 398, 298, 239$ МГц;
- угол визирования $\beta_B = 25 \dots 45^\circ$;
- ширина ДНА в угломестной плоскости $\theta_y = 1.05^\circ$;
- высота орбиты $H = 600$ км;
- орбитальная скорость КА – носителя ВРЛК $v_o = 1649$ м/с;
- дальность до цели $R = 660 \dots 870$ км;
- время синтезирования $t_H = 8.05 \dots 8.71$ с;

– коэффициент ухудшения разрешающей способности $k_{вс} = 1.47$;

– температура $t = 10^\circ \text{C}$;

– атмосферное давление $p_{атм} = 1010$ мбар;

– давление водяных паров $e = 1.23$ мбар;

– СКО девиации частоты $\xi[\Delta f] = 1$ МГц;

– СКО определения угла визирования $\xi[\beta_B] = 0.01^\circ$;

– СКО определения ширины ДНА в угломестной плоскости $\xi[\theta_y] = 0.01^\circ$;

– СКО определения длины волны $\xi[\lambda] = 0.0001$ м;

– СКО определения коэффициента расширения импульса $\xi[k_{вс}] = 0.001$;

– СКО определения наклонной дальности $\xi[R] = 100$ м;

– СКО определения орбитальной скорости КА $\xi[v_o] = 10$ м/с;

– СКО определения времени синтезирования $\xi[t_H] = 0.0001$ с.

Результаты расчетов для различных углов визирования и значений девиации частоты представлены в табл. 2 и 3.

Табл. 2. Разрешающая способность РСА по дальности в режиме детальной съемки

Table 2. Range resolution of the SAR in the detailed shooting mode

$\beta_B, \dots^\circ$	$L, \text{ км}$	Разрешающая способность по дальности, м			Погрешность расчета, мм		
		$\Delta f, \text{ МГц}$			$\Delta f, \text{ МГц}$		
		398	298	239	398	298	239
25.0	283	1.18	1.57	1.96	27.5	36.7	45.7
26.0	296	1.14	1.52	1.89	25.3	33.8	42.1
27.0	310	1.10	1.47	1.83	23.4	31.2	38.9
28.0	324	1.06	1.42	1.77	21.6	28.9	36.0
29.0	338	1.03	1.38	1.71	20.1	26.8	33.4
30.0	352	1.00	1.33	1.66	18.7	24.9	31.1
31.0	367	0.97	1.30	1.62	17.4	23.3	29.0
32.0	382	0.94	1.26	1.57	16.3	21.7	27.1
33.0	398	0.92	1.23	1.53	15.2	20.3	25.4
34.0	414	0.90	1.20	1.49	14.3	19.1	23.8
35.0	431	0.87	1.17	1.45	13.4	17.9	22.3
36.0	448	0.85	1.14	1.42	12.6	16.8	21.0
37.0	465	0.83	1.11	1.39	11.9	15.9	19.8
38.0	484	0.81	1.09	1.36	11.2	15.0	18.7
39.0	502	0.80	1.06	1.33	10.6	14.1	17.6
40.0	522	0.78	1.04	1.30	10.0	13.4	16.7
41.0	542	0.77	1.02	1.27	9.5	12.6	15.8
42.0	563	0.75	1.00	1.25	9.0	12.0	14.9
43.0	585	0.74	0.98	1.23	8.5	11.4	14.2
44.0	608	0.72	0.97	1.20	8.1	10.8	13.4
45.0	632	0.71	0.95	1.18	7.7	10.2	12.8

Табл. 3. Разрешающая способность РСА в азимутальном направлении в режиме детальной съемки
Table 3. Resolution of the SAR in azimuth direction in the detailed shooting mode

$\beta_B, \dots^\circ$	$L, \text{ км}$	$t_n, \text{ с}$	$R, \text{ км}$	Разрешающая способность в азимутальном направлении, м	Погрешность расчета, мм
25.0	283	8.05	666	0.18	0.7
26.0	296	8.07	672	0.18	0.7
27.0	310	8.09	678	0.18	0.7
28.0	324	8.11	685	0.18	0.7
29.0	338	8.13	692	0.18	0.7
30.0	352	8.15	700	0.18	0.8
31.0	367	8.18	708	0.19	0.8
32.0	382	8.2	716	0.19	0.8
33.0	398	8.23	725	0.19	0.8
34.0	414	8.26	735	0.19	0.8
35.0	431	8.29	745	0.20	0.8
36.0	448	8.32	755	0.20	0.8
37.0	465	8.36	766	0.20	0.8
38.0	484	8.39	778	0.21	0.8
39.0	502	8.43	790	0.21	0.9
40.0	522	8.47	804	0.22	0.9
41.0	542	8.51	818	0.22	0.9
42.0	563	8.56	832	0.22	0.9
43.0	585	8.61	848	0.23	0.9
44.0	608	8.66	865	0.24	1.0
45.0	632	8.71	883	0.24	1.0

Выводы. Анализ полученных результатов свидетельствует об адекватности использованного математического аппарата, обеспечившего получение расчетными методами важной технической характеристики космической РСА, в частности оценки пространственного разрешения ее бортовой аппаратуры с учетом влияния разнородных факторов внешней среды.

Разработанные методы позволяют проводить специальные расчеты априорной оценки предельно возможной пространственной разрешающей способности РЛИ для следующих режимов функционирования ВРЛК: детальной, маршрутной и обзорной съемки, наблюдения объектов, находящихся на водной или равнинной поверхности Земли.

Следует также отметить, что предложенные методы получения оценок пространственной разрешающей способности могут обеспечивать эффективное решение задач по проведению сравни-

тельного анализа РСА с альтернативными отечественными или зарубежными аналогами.

Таким образом, разработанная методика расчетной (априорной) оценки разрешающей способности по дальности и в азимутальном направлении с учетом влияния параметров атмосферы позволяет оценить геометрические параметры объектов, которые возможно будет зафиксировать на РЛИ, а также обосновать требования к выбору ВРЛК с заданными тактико-техническими характеристиками.

Практическая значимость предложенной методики заключается в ее применимости как инструментария оптимизации выбора конструктивного построения перспективных ВРЛК на этапе жизненного цикла их проектирования, что существенно сократит временные и финансовые затраты создания сложных систем при обеспечении требуемых характеристик качества их функционирования.

Список литературы

1. Справочник по радиолокации: в 2 кн. Кн. 2 / под ред. М. И. Сколника; пер. с англ. под ред. В. С. Вербы. М.: Техносфера, 2015. 680 с.
2. Свистов В. М. Радиолокационные сигналы и их обработка М.: Сов. радио, 1977. 448 с.
3. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / под ред. В. С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.

4. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справочник / Я. Д. Ширман, Ю. И. Лосев, Н. Н. Минервин и др.; под ред. Я. Д. Ширмана; ЗАО "МАКВИС". М., 1998. 828 с.
5. Современная радиолокация / пер. с англ. под ред. Ю. Б. Кобзарева. М.: Сов. радио, 1969. 704 с.
6. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений

жений; под ред. Л. А. Школьного. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2008. 513 с.

7. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли / под ред. Г. С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.

8. Авиационные системы радиовидения / под ред. Г. С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2015. 648 с.

9. Винокуров В. И., Генкин В. А., Калениченко С. П. Морская радиолокация / под ред. В. И. Винокурова. Л.: Судостроение, 1986. 256 с.

10. Paduan J. D., Washburn L. High-Frequency Radar Observations of Ocean Surface Currents // Annual Review of Marine Science. 2012. Vol. 5, iss. 1. P. 115–136. doi: 10.1146/annurev-marine-121211-172315

11. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения,

теоремы, формулы / пер. с англ. под общ. ред. И. Г. Арамановича. М.: Наука, 1974. 831 с.

12. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В. Н. Антипов, В. Е. Горяинов, А. Н. Кулин и др.; под ред. В. Т. Горяинова. М.: Радио и связь, 1988. 304 с.

13. Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Ч. 1. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. 164 с.

14. Куприяшкин И. Ф., Лихачев В. П. Космическая радиолокационная съемка земной поверхности в условиях помех. Воронеж: Науч. кн., 2014. 460 с.

15. Занин К. А. Анализ качества координатной привязки изображений космического радиолокатора с синтезированной апертурой // Вестн. НПО им. С. А. Лавочкина. 2013 № 4. С. 34–39.

Информация об авторах

Гусев Сергей Николаевич – кандидат технических наук (2019), начальник лаборатории военного института (научно-исследовательского) ФГБВОУ "Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского" (ВКА). Автор более 20 научных и учебно-методических публикаций. Сфера научных интересов – радиоэлектронная борьба и радиолокационные системы.

Адрес: Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, ул. Ждановская, д. 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия

E-mail: gusev_sn@mail.ru

Журавлев Сергей Викторович – кандидат технических наук (1993), старший научный сотрудник (2000) ВКА. Автор более 20 научных и учебно-методических публикаций, 14 авторских свидетельств и патентов. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов и навигационные системы.

Адрес: Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, ул. Ждановская, д. 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия

E-mail: sawojar@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8520-9203>

Попов Анатолий Васильевич – кандидат технических наук (1989), старший научный сотрудник (1998) ВКА. Автор более 30 научных и учебно-методических публикаций, 7 авторских свидетельств и патентов. Сфера научных интересов – радиолокация и цифровая обработка сигналов.

Адрес: Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, ул. Ждановская, д. 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия

E-mail: avpop55@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4955-4031>

References

1. Skolnik M. I. Radar Handbook, Third Edition. Ed. 2. tr. from eng. V. S. Verbi. M., *Tehnosfera*, 2015, 680 p. (In Russ.)

2. Svistov V. M. Radar signals and their processing. M., Sov. Radio, 1977, 448 p.

3. Space-based earth survey radar systems. Ed. by V. S. Verba. M., Radio Engineering, 2010, 680 p.

4. Shirman Ya. D., Losev Yu. I., Minervin N. N. etc.; edited by Ya. D. Shirman. Radioelectronic systems: fundamentals of construction and theory: reference. M., ZAO "MAQUIS", 1998, 828 p.

5. Modern radar. Trans. from English. Ed. by Yu. B. Kobzarev. M., *Sov. radio*, 1969, 704 p.

6. The radar system of air reconnaissance, the interpretation of radar images. Ed. by L. A. Shkolny. M., ed. VVIA im. prof. N. E. Zhukovsky, 2008, 513 p.

7. Radio vision. Radar systems for remote sensing of the Earth. Ed. by G. S. Kondratenkov. M., Radio Engineering, 2005, 368 p.

8. Aviation radio vision systems. Ed. by G. S. Kondratenkov. M., Radio Engineering, 2015, 648 p.

9. Vinokurov V. I., Genkin V. A., Kalenichenko S. P. Morskaya radolokatsiya. ed. V. I. Vinokurov. L., *Sudostroenie*, 1986, 256 p.

10. Paduan J. D., Washburn L. High-Frequency Radar Observations of Ocean Surface Currents. Annual Review

of Marine Science. 2012, vol. 5, iss. 1, pp. 115–136. doi: 10.1146/annurev-marine-121211-172315

11. Korn G., Korn T. Handbook of Mathematics for researchers and engineers. Definitions, theorems, formulas. under the general editorship of I. G. Aramanovich. M., *Nauka*, 1974, 831 p. (accessed 22.06.2020)

12. Antipov V. N., Goryainov V. E., Kulin A. N. et al. Radar stations with digital synthesis of the antenna aperture; ed. by V. T. Goryainov M., Radio and Communications, 1988, 304 p.

13. Konovalov A. A. Fundamentals of trajectory processing of radar information. Part 1. St Petersburg, Publishing House of SPbGETU "LETI", 2013. 164 p.

14. Kudryashkin I. F., Likhachev V. P. Space radar imagery of the earth's surface in the presence of noise. Voronezh, *Nauchnaya kniga*, 2014. 460 p.

15. Zanin K. A. Analysis of the quality of the coordinate reference of images of a space radar with a synthesized aperture. Bulletin of the S. A. Lavochkin NGO. 2013, no. 4, pp. 34–39.

Information about the authors

Sergey N. Gusev, Cand. Sci. (Eng.) (2019), Head of the laboratory of the Mozhaisky Military Space Academy (MSA). Author of more than 20 scientific and educational publications. Area of expertise: electronic warfare and radiolocation systems.

Address: A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 13 Zhdanovskaya St., St Petersburg 197198, Russia
E-mail: gusev_sn@mail.ru

Sergey V. Zhuravlev, Cand. Sci. (Eng.) (1993), Senior Researcher (2000) of the MSA. Author of more than 20 scientific and educational publications, 14 author's certificates and patents. Area of expertise: digital signal processing and navigation systems.

Address: A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 13 Zhdanovskaya St., St Petersburg 197198, Russia
E-mail: sawojar@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8520-9203>

Anatolij V. Popov, Cand. Sci. (Eng.) (1989), Senior Researcher (1998) of the MSA. Author of more than 30 scientific and educational publications, 7 author's certificates and patents. Area of expertise: digital signal processing and radiolocation systems.

Address: A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 13 Zhdanovskaya St., St Petersburg 197198, Russia
E-mail: avpop55@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4955-4031>

Микро- и наноэлектроника

УДК 681.7.064.49

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-81-97>

Магнитные и плазмонные композиционные наноструктуры для реализации оптических фильтров в системах контроля и диагностики веществ и материалов

Р. С. Смердов^{1✉}, Ю. М. Спивак², В. А. Мошников², А. С. Мустафаев¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

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

✉ rostofan@gmail.com

Аннотация

Введение. Пористый кремний (ПК) и материалы на его основе представляют интерес для применения в наноэлектронике, таргетированной доставке препаратов и перспективных детекторах газов. Разработки в области создания наноструктур на базе ПК актуальны для реализации фильтров в системах волоконно-оптической связи, поскольку современные интерференционные фильтры характеризуются наличием побочных полос в рабочем диапазоне и требуют поддержания высокого вакуума при нанесении покрытий нанометровой толщины.

Цель работы. Разработка прототипов полосно-заграждающего фильтра оптического диапазона на основе композиционных магнитных наночастиц и эффекта локализованного поверхностного плазмонного резонанса (ЛППР) в массиве наночастиц серебра на поверхности ПК.

Материалы и методы. Разработка и получение наноструктур для создания прототипов фильтров. Применение метода двойного дифференцирования совместно с теорией поглощения Ми для анализа характеристик затухания прототипов.

Результаты. Разработаны 2 прототипа; анализ характеристики затухания прототипа на основе функционализированной магнитными наночастицами Fe_mO_n матрицы SiO_2 позволяет связать параметры обнаруженных полос поглощения с размером наночастиц Fe_mO_n . Характеристика затухания прототипа на основе ЛППР в массиве наночастиц Ag на поверхности пористого кремния содержит две полосы поглощения. Значение средней длины волны в полосе, обусловленной ЛППР в массиве наночастиц серебра, близких по форме к сферическим, составляет 367.5 нм. Возбуждение ЛППР в квантовых кластерах серебра, сопровождающееся появлением соответствующей полосы, происходит на длине волны 265.5 нм. Изменение параметров синтеза ПК матрицы позволяет управлять подавлением в каждой из обнаруженных полос.

Заключение. Несмотря на недостатки, в том числе сравнительно низкую точность задания средней длины волны, а также трудоемкость уменьшения неравномерности в полосе поглощения, полученные прототипы превосходят существующие аналоги и являются перспективными для решения задач разработки компактных систем анализа и диагностики в широком энергетическом диапазоне.

Ключевые слова: полосно-заграждающий фильтр, плазмонный резонанс, пористый кремний, массив наночастиц, теория Ми, модель Друде, метод Унно–Имаи

Для цитирования: 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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы благодарят доцента кафедры МНЭ СПбГЭТУ к.т.н. К. Г. Гареева за проведение синтеза композиционных наночастиц $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{--SiO}_2$.

Статья поступила в редакцию 19.03.2021; принята к публикации после рецензирования 22.04.2021; опубликована онлайн 29.06.2021



Magnetic and Plasmonic Composite Nanostructures for Creating Optical Filters at Substance and Material Diagnostics Systems

Rostislav S. Smerdov^{1✉}, Yulia M. Spivak², Vyacheslav A. Moshnikov², Alexander S. Mustafaev¹

¹ Saint Petersburg Mining University, St Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ rostofan@gmail.com

Abstract

Introduction. Porous silicon (PS) and materials on its basis are of interest for application in nanoelectronics, targeted drug delivery and advanced gas sensors. In addition, PS-based nanostructures are promising as filters in fibre-optic communication systems, since conventional thin-film deposition filters possess sidebands in their operating range thus requiring high vacuum for nanometer-thick coatings.

Aim. To develop optical band-stop filter prototypes based on composite magnetic nanoparticles and the effect of localized surface plasmon resonance (LSPR) in an array of silver nanoparticles located on the PS surface.

Materials and methods. The development and synthesis of nanostructures for the creation of filter prototypes. The double differentiation method in conjunction with Mie absorption theory was used for processing and analyzing the prototypes attenuation characteristics.

Results. Two prototypes were developed. An analysis of the attenuation characteristics of a prototype based on SiO₂ matrix functionalized by Fe_mO_n indicated that the parameters of the detected absorption bands depend on the size of Fe_mO_n nanoparticles. The attenuation characteristics of the LSPR-based prototype contain two absorption bands. The center wavelength value in the band caused by LSPR in the array of silver nanoparticles, close to spherical, is 367.5 nm. Excitation of LSPR in silver quantum clusters, manifested by the appearance of the corresponding band, occurs at a wavelength of 265.5 nm. The suppression in each of the bands can be controlled by changing the parameters of the PS matrix synthesis.

Conclusion. Despite the disadvantages, e.g. a relatively low accuracy in setting the center wavelength, as well as certain difficulties concerned with reducing the unevenness in the absorption band, the obtained prototypes surpass existing analogues and are prospective for the development of compact analysis and diagnostics systems in a wide energy range.

Keywords: band-stop filter, plasmon resonance, porous silicon, nanoparticle array, Mie theory, Drude model, Unno–Imai method

For citation: 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. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 3, pp. 81–97. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-81-97

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

Acknowledgments. The authors are grateful to the associate professor of the MNE Department, ETU, Cand. Sci. (Eng.) K. G. Gareev for the synthesis of composite Fe_mO_n–SiO₂ nanoparticles.

Submitted 19.03.2021; accepted 22.04.2021; published online 29.06.2021

Введение. Стремительное развитие возникшего в конце XX в. направления научно-технических исследований, получившего название "нанотехнологии", позволяет предлагать новые решения ряда комплексных задач контроля и диагностики окружающей среды [1–3], веществ [4, 5] и материалов [6–8], создания приборов нового поколения

[9–11] и разработки энергетических систем [12, 13]. Особую актуальность представляют оптические свойства нанообъектов и возможность их использования при реализации инфокоммуникационных систем передачи сигналов с мультиплексированием, демультиплексированием и фильтрацией в соответствующем частотном диапазоне.

В литературе имеются данные по использованию оптических гетероструктур, т. е. систем, представляющих собой совокупность элементов со скачкообразно изменяющимися параметрами [5]. Такие структуры принято разделять на цепи с распределенными (так называемые волновые аналоговые фильтры) и сосредоточенными параметрами. Первый класс приборов характеризуется более высокой стабильностью, технологичностью и надежностью по сравнению с фильтрами из сосредоточенных элементов [5] и находит широкое применение в области создания инфокоммуникационных систем, радиотехнических комплексов, а также электронной и оптической связи.

В качестве волновых аналоговых фильтров для случая сверхвысокочастотных сигналов могут быть использованы отрезки передающих линий на базе волноводов, а в оптическом диапазоне в этом качестве обычно применяют дифракционные решетки, тонкопленочные интерференционные фильтры на основе многослойных покрытий с различными показателями преломления, а также отрезки световодов.

Одними из наиболее перспективных прототипов фильтров электромагнитных сигналов оптического диапазона являются приборы, в основе функционирования которых лежит явление локализованного поверхностного плазмонного резонанса в массиве металлических наночастиц.

Практическая реализация таких приборов представляет определенные трудности технологического характера, связанные в первую очередь с отсутствием технологий для промышленного производства подобных материалов. Тем не менее плазмонные наноструктуры [14] обладают целым рядом преимуществ при создании прецизионных фильтров (в том числе заграждающих) оптического диапазона, включая возможность модификации полосы пропускания за счет выбора материала и морфологии самих структур, отсутствие побочных полос в рабочем частотном диапазоне фильтров (в отличие от современных волновых аналоговых фильтров, в том числе радиочастотных и оптических) [5], устойчивость устройств на базе плазмонных наномассивов к агрессивным средам, в том числе биологическим и химическим растворам, не вступающим (в основной массе) в реакцию с золотыми и серебряными наночастицами, сравнительно низкую стоимость подобных устройств в случае использования электрохимической технологии синтеза, а также анизотропию

амплитудно-частотной характеристики фильтров на основе локализованного поверхностного плазмонного резонанса в 2D-массиве наночастиц, которая позволяет использовать этот тип структур в качестве поляризационного фильтра терагерцового и видимого диапазонов [14].

Использование магнитных наночастиц для построения оптических фильтров также представляет интерес, поскольку существует необходимость создания систем, допускающих перестройку как по средней длине волны, так и по ширине полосы. В литературе имеются данные по подобным прототипам, использующим магнитные жидкости на базе Fe_3O_4 [15, 16]. Тем не менее такие системы недостаточно стабильны, поскольку характеризуются высокой склонностью к неконтролируемому образованию агломератов с последующей коагуляцией и седиментацией магнитных частиц.

С целью преодоления приведенных недостатков в ходе описываемой работы авторами были реализованы прототипы заграждающих фильтров ближнего ультрафиолетового и видимого диапазонов двух типов – на базе поглощения Ми и явления локализованного поверхностного плазмонного резонанса. Исследования характеристик затухания показывают, что, несмотря на имеющиеся недостатки, полученные прототипы превосходят существующие альтернативы с точки зрения диапазона задания средней длины волны.

Цель работы. Цель описываемых исследований – создание прототипов заграждающего фильтра оптического диапазона на основе коллоидного раствора композиционных магнитных наночастиц и явления локализованного поверхностного плазмонного резонанса в массиве наночастиц серебра.

Материалы и методы. Композиционные наноструктуры на базе пористого оксида кремния были получены в УНЛ "Наноматериалы" К. Г. Гареевым при реализации золь-гель-процесса и последующем термическом отжиге. На первом этапе был изготовлен золь посредством растворения тетраэтоксисилана в изопропиловом спирте. При синтезе серии в качестве параметра выступала объемная доля TEOS в диапазоне от 20 до 80 %.

На втором этапе добавлением гидрированного аммиака был запущен золь-гель-процесс. Полученный материал был высушен при нормальных условиях, а затем в течение 15 мин подвергался термической обработке при температуре 300 °C для получения структуры ксерогеля.

Функционализация синтезированных материалов магнитными наночастицами и получение растворов композиционных наночастиц $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{-SiO}_2$ проводились непосредственно в водном растворе солей двух- и трехвалентного железа, седиментация данных составов не происходила в течение как минимум 28 дней благодаря наличию пористого гелевого SiO_2 -скелета.

Таким образом, в ходе золь-гель-процесса и реакции соосаждения Fe^{2+} и Fe^{3+} из солей двух- и трехвалентного железа (реакция Массарта) на поверхность наноразмерного гелевого скелета SiO_2 была синтезирована структура типа ядро-оболочка (core-shell). При этом агломераты Fe_mO_n образовали на поверхности SiO_2 суперпарамагнитные однодоменные структуры [17, 18]. Более подробно процедура синтеза описана в [18].

Для реализации прототипа фильтра оптического диапазона на основе явления локализованного поверхностного плазмонного резонанса авторы использовали разработанную ими технологию создания и функционализации поверхности пористого кремния металлическими наночастицами [19]. Необходимость создания на поверхности исходного образца обратного металлического слоя, представляющего собой один из электродов, является основным технологическим недостатком классических систем травления, используемых на сегодняшний день [20]. Данная методика требует удаления этого слоя перед последующим процессом функционализации поверхности пористого материала (например, наночастицами серебра). Используемая в ходе работы система анодирования не требует создания обратного слоя металла. Представленное схематическое изображение ячейки анодного электрохимического травления (рис. 1) иллюстрирует одну из возможных методик реализации такой системы по методу Унно–Имаи [20]. Модифицируемый образец разделяет ячейку на две идентичные части, заполненные фтороводородной кислотой (HF) на протяжении всей реакции анодирования. Электрический ток, генерируемый платиновыми электродами через HF, поступает непосредственно на модифицируемый образец (пластину кремния). Представленная на рисунке конфигурация устройства с соответствующим образом приложенным потенциалом – левый электрод – катод (эмиттер), правый – анод (коллектор) – способствует формированию пористого слоя на прикатодной стороне кремниевой пластины [20].

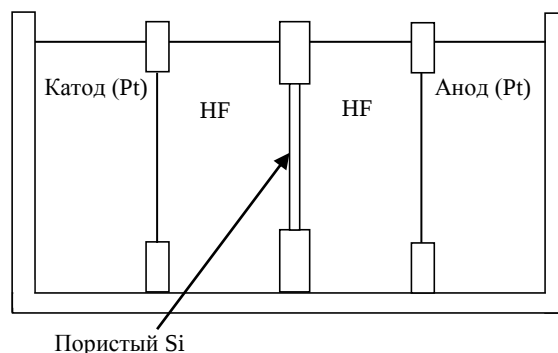


Рис. 1. Схематическое изображение ячейки для анодного электрохимического травления, использующей метод Унно–Имаи

Fig. 1. Schematic representation of a Unno–Imai anodic electrochemical etching cell

В процессе травления на поверхности кремния образуются пустоты, сразу же заполняющиеся фтороводородной кислотой, циркулирующей в обеих секциях ячейки анодирования. Проникновение образующегося на поверхности кремния пористого слоя может составлять до 10 % от толщины образца (при использовании в качестве исходного материала подложек диаметром 3 см).

Поскольку одной из задач работы являлась реализация управляемой технологии синтеза композиционных нанослоев функционализированного пористого кремния с различной структурой поверхности и развитостью, в качестве параметров были выбраны плотность тока анодирования и продолжительность травления. В табл. 1 представлены условия синтеза композиционных структур.

Табл. 1. Параметры синтеза пористого кремния
Table 1. Porosilicon matrix synthesis parameters

Подложка	Удельное сопротивление, Ом·см	Кристаллографическая ориентация пластин Si	Время травления, мин	Плотность тока, мА/см ²
КЭФ	4.5	(100)	10	15
			40	
КЭФ	4.5	(100)	10	2
				15
				30

В качестве источника ионов металла был использован нитрат серебра (AgNO_3). Схематически трехэлектродная ячейка для осаждения представлена на рис. 2.

Поддержание рабочей точки по потенциалу осуществляется с применением потенциостат-гальваностата Elins P-40X.

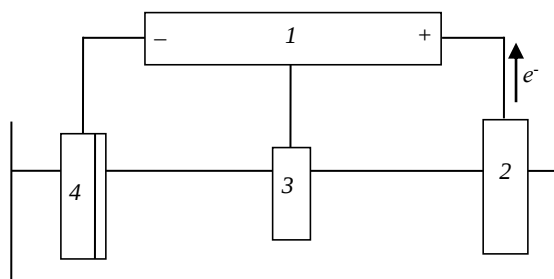


Рис. 2. Схематическое изображение ячейки для функционализации параметра: 1 – потенциостат; 2 – анод (Pt); 3 – электрод сравнения; 4 – рабочий электрод (катод)

Fig. 2. Schematic representation of a functionalization cell: 1 – potentiostat; 2 – anode (Pt); 3 – reference electrode; 4 – executing electrode (cathode)

Методика измерения и анализа характеристик затухания прототипов разложением на гауссовские составляющие. Спектры оптического поглощения и пропускания образцов измерялись при нормальных условиях спектрофотометром марки Specord 40, изготовленным фирмой "Analytik Jena". Оптическая плотность исследовалась в интервале 0...2.0 (2.2), а пропускание образцов измерялось с погрешностью 0.01.

Согласно работе Леви [21] при анализе релаксационных спектров оптического поглощения методом электронно-абсорбционной спектроскопии форма полос наведенного поглощения (ПНП) считается гауссовской. Так, согласно [21] можно записать:

$$K(\nu) = K_0 \exp \left[-\frac{4 \ln 2}{U^2} (\nu - \nu_0)^2 \right], \quad (1)$$

где K_0 – коэффициент поглощения в максимуме ПНП, см^{-1} ; U – полуширина полосы поглощения, эВ; ν_0 – положение максимума ПНП, эВ.

Использованная авторами методика разложения спектров оптического поглощения на составляющие заключается в представлении спектра в координатах оптическая плотность – энергия (в электрон-вольтах) с последующим дифференцированием для уточнения положения, полуширины и интенсивности полос поглощения (1).

Дифференциальная спектроскопия использует производные от поглощения первого порядка и выше для качественного и количественного анализа. Идея дифференцирования спектральных данных, представленная в 1950 гг., продемонстрировала множество преимуществ. Данная техника не пользовалась большой популярностью из-за сложности производимых вычислений, однако

с появлением производительных ЭВМ получила широкое распространение.

В случае представления исходной характеристики затухания (спектра) как функции длины волны $A = f(\lambda)$ (рис. 3, а) соответствующие производные можно записать в виде $dA/d\lambda = f'(\lambda)$ и $d^2A/d\lambda^2 = f''(\lambda)$ для первого и второго порядков соответственно. Производная первого порядка, т. е. скорость изменения затухания относительно длины волны входного сигнала, проходит через "0" на длине волны, соответствующей максимуму полосы поглощения ($\lambda_{\max}$) (рис. 3, б). По обе стороны от этой точки располагаются полосы с максимумами и минимумами, соответствующими точкам перегиба характеристики затухания. Биполярная функция такого вида характерна для всех производных нечетных порядков (рис. 3, в).

Общее свойство производных второго порядка заключается в наличии отрицательной полосы с минимумом на длине волны, характерной для максимума полосы поглощения в исходной характеристике затухания (рис. 3, в). Также на графике присутствуют две дополнительные положительные вспомогательные полосы по обе стороны от основной полосы.

В свою очередь график производной четвертого порядка содержит положительную полосу на той же длине волны (рис. 3, д), при этом общее число полос оказывается на единицу выше порядка производной.

Если предположить, что характеристика затухания в полосе подчиняется закону Бугера–Ламберта–Бера, то существует аналогичная линейная связь между концентрацией и амплитудой производных любых порядков, где λ – длина волны; A – поглощение; ε – коэффициент экстинкции; b – длина оптического пути в образце; c – концентрация образца. Тогда, для оригинального спектра $A = \varepsilon bc$, а $dA/d\lambda = (d\varepsilon/d\lambda)bc$ и $d^n A/d\lambda^n = (d^n \varepsilon/d\lambda^n)bc$ для производных второго и n -го порядков соответственно.

При исследовании дифференциальных спектров выбор соответствующих длин волн для проведения количественных оценок однокомпонентных систем оказывается сложнее, чем при анализе спектров поглощения (нулевого порядка).

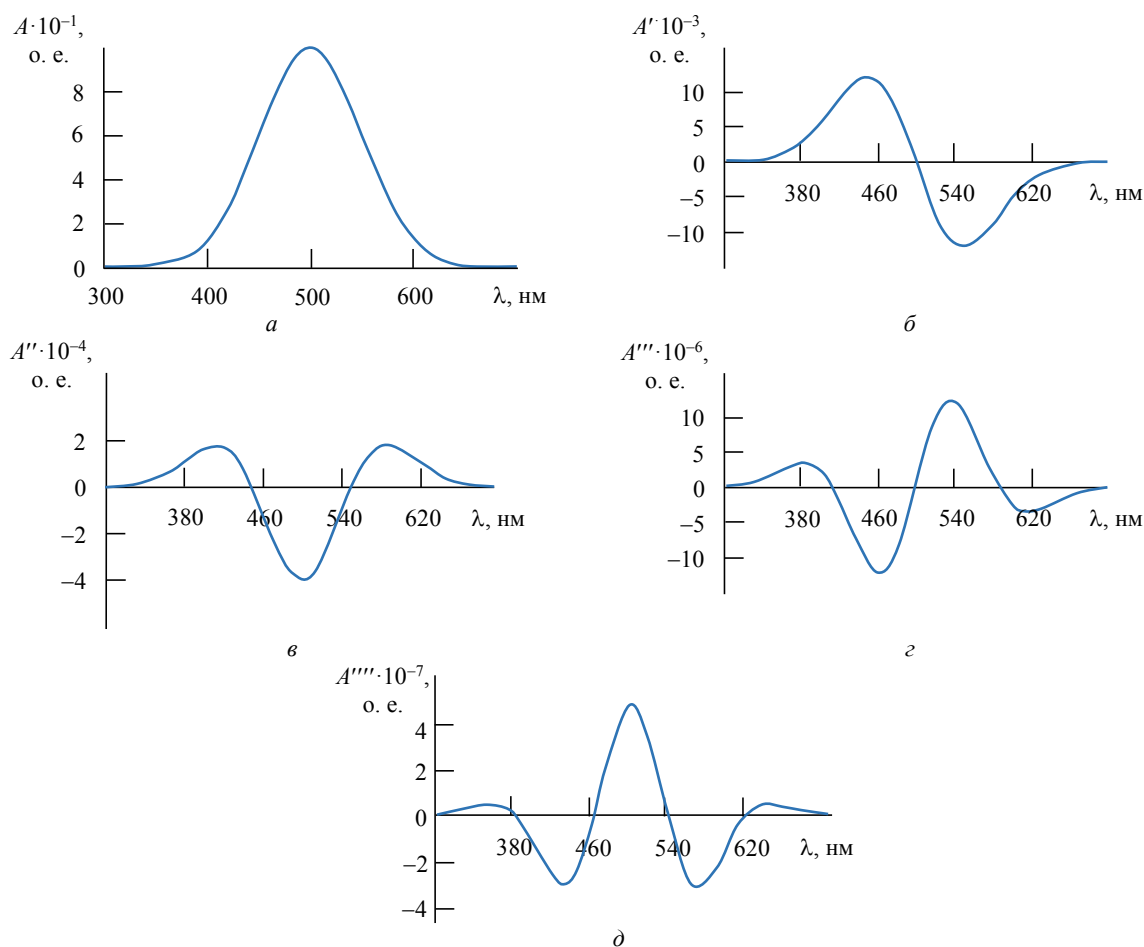


Рис. 3. Описание процедуры обработки характеристики затухания прототипов: *a* – интенсивность затухания; *б* – первая производная интенсивности затухания; *в* – вторая производная интенсивности затухания; *г* – третья производная интенсивности затухания; *д* – четвертая производная интенсивности затухания

Fig. 3. Description of the procedure used for processing the attenuation characteristics of the prototypes: *a* – attenuation intensity; *б* – first derivative of attenuation intensity; *в* – second derivative of attenuation intensity; *г* – third derivative of attenuation intensity; *д* – fourth derivative of attenuation intensity

Действительно, для производных спектров четных порядков на той же длине волны $\lambda_{\max}$, что и в спектре поглощения, существует экстремум (максимум или минимум), однако значения производных нечетных порядков на данной длине волны достигают нуля. Теоретически, использование длин волн, характерных для высочайшего максимума и глубочайшего минимума с последующей оценкой разности соответствующих амплитуд, позволяет получить наилучшее возможное соотношение сигнал/шум, однако такой подход может приводить к ошибкам, связанным с влиянием на исследуемый спектр сигналов от других компонентов (например, при работе со смесями, содержащими соединения с налагающимися друг на друга спектрами).

Процедуру дифференцирования характеристики затухания можно осуществить оптическими, электронными и математическими методами.

Оптические и электронные техники в основном использовались на старых моделях спектрофотометров, но в большинстве своем были вытеснены математическими методиками, преимущества которых заключаются в возможности проведения относительно быстрых расчетов дифференциальных спектров с различными параметрами и техниками сглаживания, которые могут быть использованы для улучшения соотношения сигнал/шум.

Необходимо отметить, что хотя использование производных (первого или более высоких порядков) вместо оригинального спектра позволяет получить более полный объем информации, неизбежны потери некоторых данных низкого порядка, таких как, например, сдвиг по оси ординат. В то же время по сравнению с оригинальным спектром рост количества полос при использовании дифференциальных спектров приводит к улучшению качества количественного анализа, а значит

и качества характеристики и идентификации материала, поскольку практически идентичные в плане оригинальных спектров вещества или структуры могут сильно отличаться по форме дифференциальных спектров. Как показано на рис. 4, *а*, ширина центральной полосы производной спектра четного порядка уменьшается с увеличением порядка. Относительно оригинального спектра ширина полосы уменьшается до 53, 41 и 34 % от исходной при втором, четвертом и шестом дифференцировании соответственно. Данное свойство может быть использовано при проведении количественного анализа для определения наличия в смеси (растворе) двух компонентов, характеризующихся присутствием в спектрах нулевого порядка полос с близкими значениями $\lambda_{\max}$ и вследствие этого не поддающихся обнаружению при непосредственном анализе оригинального спектра (рис. 4, *б*).

Следует также отметить, что дифференциальная спектроскопия является эффективным методом анализа при необходимости уменьшения влияния эффектов рассеяния на форму спектра, поскольку составляющая рассеяния (эффект Рэлея для низкоразмерных частиц либо Тиндаля для более крупных) характеризуется широкой полосой в спектрах поглощения нулевого порядка, а значит, может быть эффективно подавлена за счет последовательного дифференцирования.

Кроме того, проблема количественного анализа не ограничивается лишь одним из рассмотренных эффектов, а представляет собой совокупность нескольких явлений, в том числе рассеяния, сдвига спектра вдоль оси ординат, обусловленного, например, сменой положения кюветы с исследуемым раствором, а также присутствия нежелательных широких полос поглощения в спектре. В качестве примера на рис. 4, *в* представлена слабо различимая в спектре нулевого порядка полоса поглощения на средней длине волны 700 нм, ширина на полувысоте которой составляет ≈ 47 нм. Матрица содержит полосу шириной 353 нм со средней длиной волны 250 нм.

Из рис. 4, *в* видно, что анализ спектров нулевого порядка практически не позволяет детектировать слабоинтенсивную полосу, в то время как на спектре второго порядка (рис. 4, *з*) ее присутствие представляется очевидным.

Результаты исследования. Анализ характеристики затухания прототипа фильтра на основе композиционной структуры $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{-SiO}_2$. На рис. 5 схематически изображена композиционная наноструктура на основе наночастиц $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{-SiO}_2$ в виде полосно-заграждающего фильтра, характеристики которого были исследованы в процессе измерения спектров оптического поглощения. Характеристики затухания прототипов фильтра

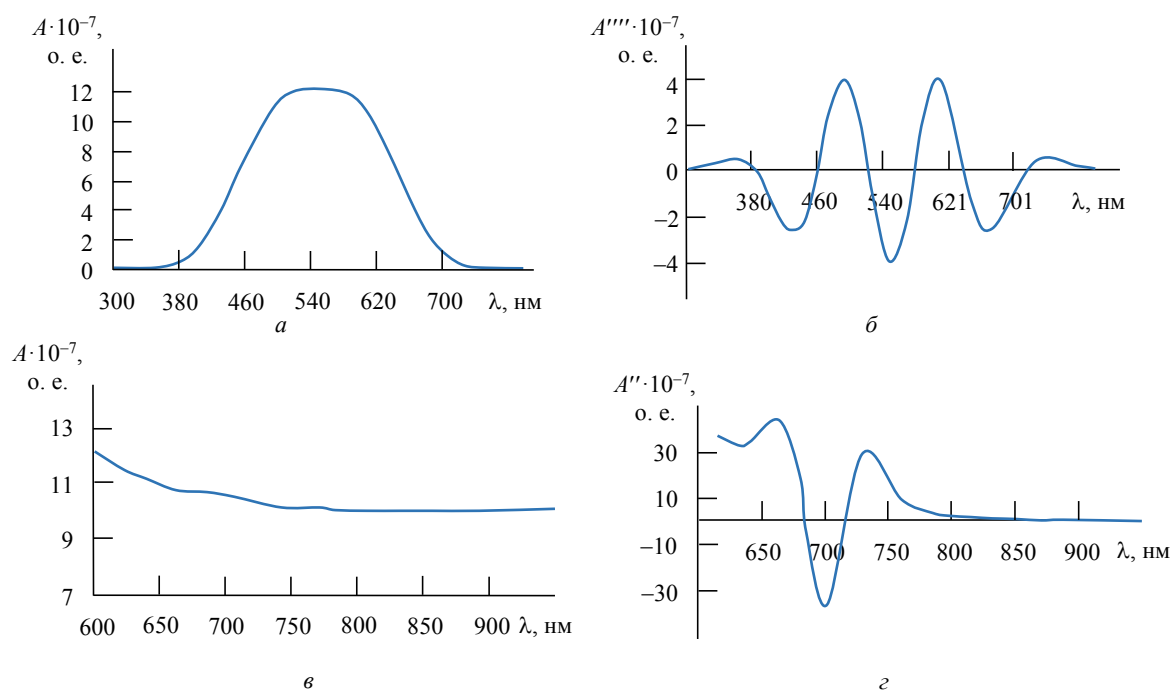


Рис. 4. Пример использования процедуры дифференцирования при обработке характеристик затухания: *а, б* – увеличение разрешающей способности; *в, з* – подавление паразитных эффектов матрицы

Fig. 4. An example of using a differentiation technique when processing the attenuation characteristics: *а, б* – increasing the resolution; *в, з* – suppression of parasitic effects of the matrix

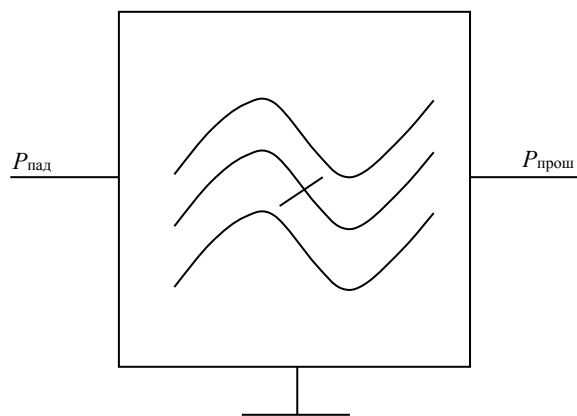


Рис 5. Схема прототипа полосно-заграждающего фильтра на основе композиционной структуры $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{-SiO}_2$

Fig. 5 Block diagram of the prototype band-stop filter based on the $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{-SiO}_2$ composite structure

на основе коллоидного раствора композиционных наночастиц $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{-SiO}_2$ $A(\lambda) = P_{\text{пад}} / P_{\text{прош}}$, где $P_{\text{пад}}$ – интенсивность входного оптического сигнала, поступающего в прототип; $P_{\text{прош}}$ – интенсивность выходного сигнала, прошедшего через прототип, были измерены методом электронно-абсорбционной спектроскопии.

Применение двойного дифференцирования позволило уточнить положение и параметры полос поглощения в характеристике затухания.

Ранее [18] было установлено, что наибольшая эффективность функционализации, которой соответствует самая высокая концентрация наночастиц Fe_mO_n на поверхности SiO_2 , может быть достигнута использованием раствора тетраэтоксисилана в изопропиловом спирте с объемной долей TEOS 60 % на стадии золь-гель-процесса.

В результате анализа полученных данных методом дифференциальной спектроскопии по ранее описанной методике были обнаружены 6 характерных полос поглощения (рис. 6) в видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазонах.

Природа обнаруженных полос поглощения связана с образованием на поверхности SiO_2 матрицы наноструктур различных размеров [19]. Согласно теории Густава Ми постоянная поглощения K для частицы относительно поглощающей матрицы задается выражением

$$K(\omega) = \frac{2\omega}{c} k_0 + \frac{3\omega}{c} C_0 \times \left\{ k_0 \left[\frac{(\epsilon_1 - a)(\epsilon_1 + 2a) + (\epsilon_1 - b)(\epsilon_1 + 2b)}{(\epsilon_1 + 2a)^2 + (\epsilon_2 + 2b)^2} \right] + \left[\frac{n_0(\epsilon_2 - b)(\epsilon_1 + 2a) - (\epsilon_1 - a)(\epsilon_2 + 2b)}{(\epsilon_1 + 2a)^2 + (\epsilon_2 + 2b)^2} \right] \right\}, \quad (2)$$

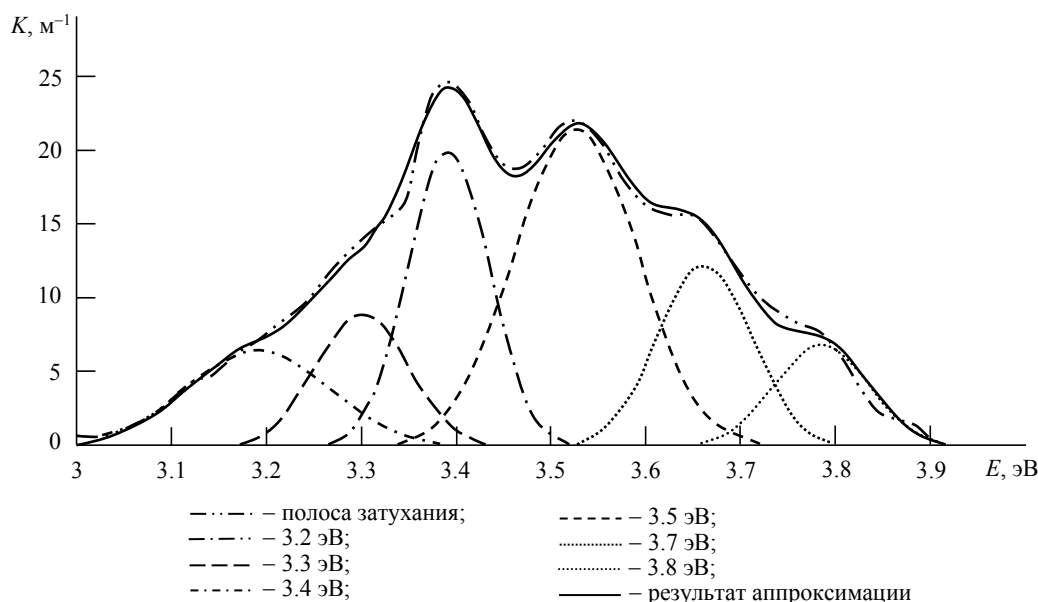


Рис. 6. Результат разложения характеристики затухания прототипа полосно-заграждающего фильтра на основе композиционной структуры $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{-SiO}_2$ на гауссовские составляющие

Fig. 6. Decomposition of the prototype band-stop filter based on the $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{-SiO}_2$ composite structure attenuation characteristic to Gaussian components

ε_1 и ε_2 – вещественная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = (\varepsilon_1 + i\varepsilon_2)$ материала наночастицы соответственно; a и b – вещественная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости матрицы $\varepsilon_{\text{matrix}} = a + ib = n_{\text{matrix}}^2 = (n_0 + ik_0)^2$; n_0 и k_0 – вещественная и мнимая части показателя преломления матрицы n_{matrix} соответственно; c – скорость света в вакууме; C_v – объемная концентрация наночастиц. Для непоглощающих матриц (2) упрощается до формулы Ми:

$$K(\omega) = \frac{9\pi n_0^3 C_v \omega}{c} \frac{\varepsilon_2}{(\varepsilon_1 + 2n_0^2)^2 + \varepsilon_2^2},$$

$\varepsilon_2(\omega)$ и $K(\omega)$ сильно зависят от радиуса наночастицы R [22]. Частота максимума в полосе поглощения ω_{max} задается значением $\varepsilon_1(\omega_{\text{max}}) = -2n_0^2$ и, таким образом, выполняется

$$K_{\text{max}}(\omega) = \frac{9\pi n_0^3 C_v \omega_{\text{max}}}{c} \frac{1}{\varepsilon_2(\omega_{\text{max}})},$$

при этом значение $\varepsilon_1(\omega)$ практически не зависит от R , следовательно, справедливо:

$$K_{\text{max}} \Gamma = AC_v = An \frac{4\pi}{3} R^3. \quad (3)$$

Расчет параметров полученного прототипа, в том числе характерных размеров агрегатов наночастиц магнетита, образованных на поверхности ксерогелевой матрицы (por-SiO₂), был проведен согласно (3). Полученные значения размеров (радиусов) наночастиц магнетита, осажденных на поверхности матрицы SiO₂, синтезированной с использованием тетраэтоксисилана в растворе с изопропиловым спиртом на стадии золь-гель-синтеза 60 % представлены в табл. 2.

Ширина полосы поглощения синтезированной наноструктуры, составляющая 61 нм, практически не меняется, что указывает на стабильность композиционного материала при сохранении размеров структур Fe_mO_n на поверхности SiO₂-матрицы.

Уровень подавления в полосе поглощения композиционной структуры составляет около 15 дБ.

Табл. 2. Результаты расчета размеров наночастиц магнетита на основе математической обработки спектров оптического поглощения

Table 2. The results of magnetite nanoparticles size calculations according to the mathematical processing of optical absorption spectra

Положение средней длины волны полосы поглощения, эВ	Положение средней длины волны полосы поглощения, нм	Размер агломератов Fe _m O _n , рассчитанный по модели Г. Ми, нм
3.19	388	156
3.30	375	173
3.39	365	226
3.52	351	231
3.66	338	192
3.79	327	159

Данный параметр возможно увеличить посредством осаждения однородного наномассива частиц магнетита с минимальными отклонениями от рассчитанного по теории Ми размера на поверхности SiO₂-матрицы. При этом максимально достижимыми являются значения подавления около 25...30 дБ, а существующие на сегодняшний день аналоги позволяют достигать значений подавления сигнала 10 дБ [16].

Неравномерность полосы поглощения синтезированного прототипа составляет ~ 1 дБ, что является его основным недостатком. Тем не менее, снижая степень агломерации наночастиц Fe_mO_n на этапе реакции соосаждения возможно регулировать данный параметр изменяя концентрации солей двух- и трехвалентного железа (Fe²⁺ и Fe³⁺). Кроме того, для достижения указанной цели необходимо обеспечить равенство значений максимумов интенсивности подавления в каждой из отдельных полос, чего можно добиться созданием функционализированной SiO₂-матрицы с равным количеством осажденных наночастиц Fe_mO_n, характеризующихся рассчитанными с использованием теории Ми требуемыми размерами.

Тем не менее из-за достаточно высоких показателей неоднородности пористой структуры матрицы SiO₂ (разброс значений диаметра пор от 5 до 50 нм [23, 24]) сохранится значительное неконтролируемое отклонение радиусов наночастиц Fe_mO_n, осаждаемых на поверхности SiO₂-матрицы. Неоднородность структуры матрицы негативно сказывается на точности позиционирования средней

длины волны полосы поглощения, поскольку диаметр и морфология пор SiO_2 определяют размер и развитость агломератов наночастиц Fe_mO_n [19].

Анализ характеристики затухания прототипа фильтра на основе плазмонного резонанса в массиве наночастиц серебра. Принцип действия предложенного в работе прототипа загораживающего фильтра на основе композиционной структуры ПК-Ag состоит в использовании явления локализованного поверхностного плазмонного резонанса для аттенюации электромагнитных сигналов определенной длины волны. При наличии отрицательных значений вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости на соответствующих частотах и превышении длиной волны поступающего электромагнитного излучения размеров наноструктуры более чем на порядок [25] происходит возбуждение локализованных поверхностных плазмонных мод в проводящих наноструктурах.

Согласно теории Друде для сферически симметричных наночастиц и решению задачи на собственные значения плазмонного резонанса [25] положение длины волны возбуждения плазмонного резонанса определяется характеристиками используемого материала (дисперсионной зависимостью) и геометрическими параметрами (морфологией) наночастиц. Из ряда теоретических исследований (см., например, [25]) известно, что

$$\sigma_{km}(\theta, \phi) = Y_{km}(\theta, \phi) (m = -k, \dots, 0, \dots, k), \quad (4)$$

где $\sigma_{km}(\theta, \phi)$ – собственные функции поверхностной плотности виртуальных электрических зарядов на границе наночастицы с вакуумом; $Y_{km}(\theta, \phi)$ – сферические гармоники, удовлетворяющие соответствующему условию ортогональности [25]; θ, ϕ – зенитный и азимутальный углы сферической системы координат соответственно. При этом

$$\lambda_k = 2k + 1, \quad (5)$$

где λ_k – собственные значения; k – натуральные числа. Из (5) следует, что возбуждение плазмонного резонанса для сферических наночастиц наблюдается при следующих значениях диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon_k = -\varepsilon_0 \frac{k+1}{k}. \quad (6)$$

Согласно (5) собственные значения λ_k обладают "геометрической" кратностью $(2k+1)$, а следовательно, каждому значению λ_k соответствует $(2k+1)$ линейно независимых собственных функций σ_{km} (4). Это вырождение обусловлено наличием геометрической симметрии сферических наночастиц и по сути является упрощенным вариантом общего случая, когда геометрическая симметрия наночастиц приводит к существованию множества собственных значений λ и резонансных значений вещественной части диэлектрической проницаемости ε_k (6).

Согласно (5) и (6) для $k=1$ и $\varepsilon_1 = -2\varepsilon_0$ имеется 3 линейно независимые плазмонные моды, соответствующие собственным функциям $\sigma_{1m}(\theta, \phi) = Y_{1m}(\theta, \phi)$. Для данных плазмонных мод электрические поля однородны и взаимно ортогональны в сферически симметричных наночастицах. Именно эти плазмонные моды, характеризующиеся дипольными моментами, отличными от нуля, возбуждаются на длинах волн ≈ 360 нм для серебряных и ≈ 500 нм для золотых наночастиц соответственно [25]. Необходимо отметить, что (6) соответствует классической теории процесса поглощения электромагнитного излучения матрицами наночастиц Г. Ми [23].

На рис. 7 схематически изображена композиционная структура на основе локализованного поверхностного плазмонного резонанса в массиве наночастиц серебра на поверхности пористого

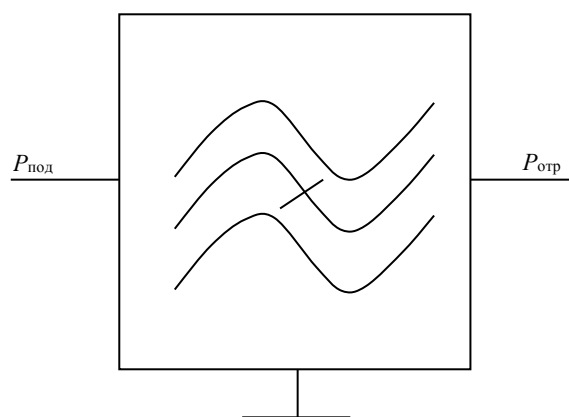


Рис. 7. Модельное представление композиционной структуры на основе плазмонного резонанса в массиве наночастиц серебра в виде отражающего фильтра

Fig. 7. Schematic representation of the acquired composite structure based on plasmonic resonance in an array of silver nanoparticles in the form of a reflective band-stop filter

кремния в виде прототипа полосно-заграждающего фильтра. Спектры оптического поглощения были измерены методом электронно-абсорбционной спектроскопии.

В качестве основного свойства прототипа фильтра была рассмотрена характеристика затухания $A(\lambda) = P_{\text{пад}} / P_{\text{отр}}$.

На рис. 8 представлен снимок поверхности композиционной структуры на основе массива фрактальных наночастиц серебра, полученный методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). На снимке присутствуют фрактальные агрегаты наночастиц серебра протяженностью ≈ 1500 нм, а также различимы одиночные изолированные наночастицы, расположенные в структуре поверхности матрицы пористого кремния.

Структура поверхности пористого кремния и отвечающее ей распределение поверхностной энергии способствуют формированию разветвленных фрактальных агрегатов серебра в процессе функционализации. Изменение параметров синтеза (плотность тока анодирования, продолжительность анодирования) матрицы пористого кремния приводит к модификации характеристик образующихся пор, в том числе их глубины и разветвленности.

Из представленных на рис. 9 и 10 характеристик затухания прототипов на базе композиционных слоев функционализированного серебром пористого кремния, где в качестве параметра выступает плотность тока (рис. 9) и время (рис. 10) анодирования исходного кремния на этапе синтеза, видно, что наблюдается возбуждение плазмонного резонанса сразу на двух длинах волн – 367.5 и 265.5 нм (3.38 и 4.68 эВ соответственно). Согласно

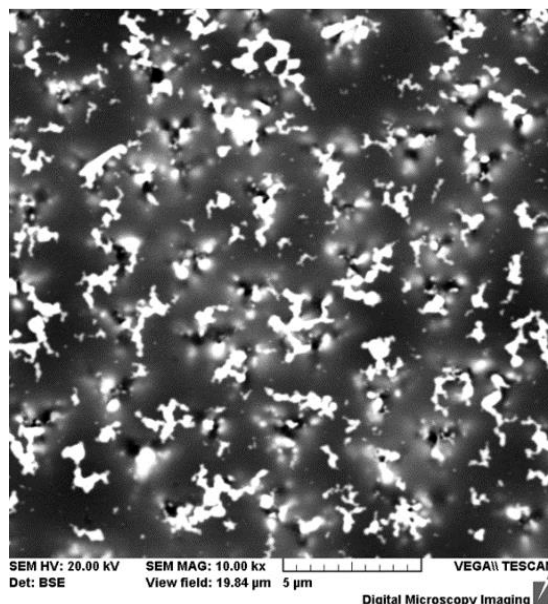


Рис. 8. Снимок РЭМ-композиционной структуры ПК-Ag (ток анодирования $j = 15$ мА/см², время анодирования $t = 40$ мин)

Fig. 8. SEM image of the PS-Ag composite structure (anodizing current $j = 15$ mA/cm², anodizing time $t = 40$ min)

приведенному в [25] решению задачи на собственные значения с целью получения конкретных значений отрицательной диэлектрической проницаемости для наноструктур соответствующего типа и при использовании дисперсионных соотношений для серебра полоса поглощения, характеризующаяся средней длиной волны $\lambda_0 = 367.5$ нм (рис. 9 и 10), обусловлена возбуждением локализованного поверхностного плазмонного резонанса в массиве сферических наночастиц серебра ($D \approx 20$ нм). В то же время полоса, характеризующаяся средней длиной волны 265.5 нм (рис. 9 и 10), соответствует плазмонной моде квантовых

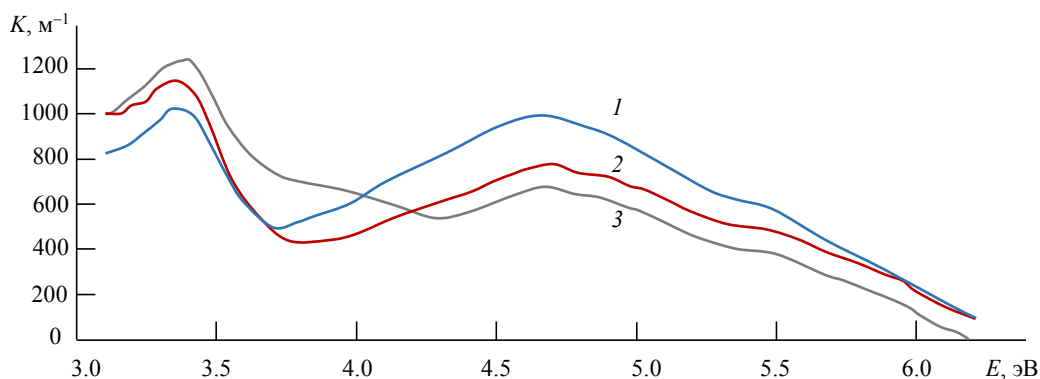


Рис. 9. Характеристики затухания прототипа полосно-заграждающего фильтра на основе плазмонного резонанса в массиве наночастиц серебра; время анодирования $t = 10$ мин, плотность тока анодирования выступает в качестве параметра: 1 – $j = 2$ мА/см²; 2 – $j = 15$ мА/см²; 3 – $j = 30$ мА/см²

Fig. 9. Characteristics of attenuation of the prototype band-stop filter based on plasmonic resonance in an array of silver nanoparticles; anodizing time $t = 10$ min, anodizing current density acts as a parameter: 1 – $j = 2$ mA/cm²; 2 – $j = 15$ mA/cm²; 3 – $j = 30$ mA/cm²

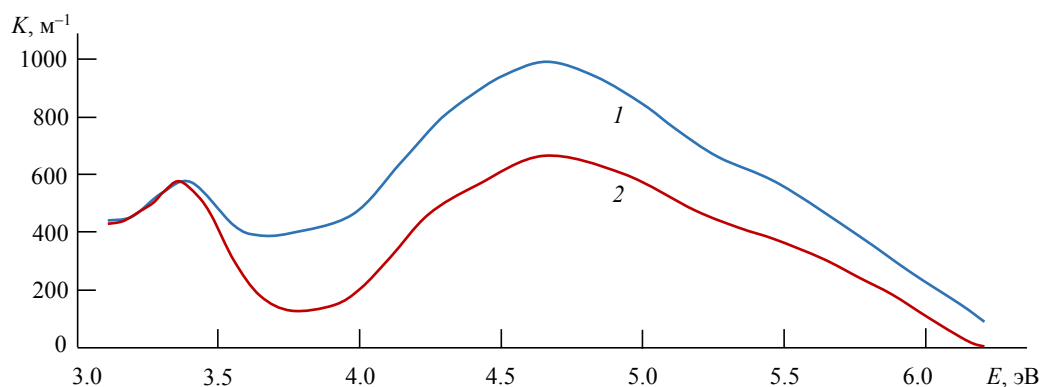


Рис. 10. Характеристики затухания прототипа полосно-заграждающего фильтра на основе плазмонного резонанса в массиве наночастиц серебра; плотность тока анодирования $j = 15 \text{ mA/cm}^2$, время анодирования выступает в качестве параметра: 1 – $t = 40 \text{ мин}$, 2 – $t = 10 \text{ мин}$

Fig. 10. Characteristics of attenuation of the prototype band-stop filter based on plasmon resonance in an array of silver nanoparticles; anodizing current density $j = 15 \text{ mA/cm}^2$, anodizing time acts as a parameter: 1 – $t = 40 \text{ min}$, 2 – $t = 10 \text{ min}$

(квантово-размерных) кластеров серебра, т. е. структур, состоящих из небольшого числа атомов и по размеру занимающих промежуточное положение между молекулами и наночастицами [26, 27]. Так, спектры поглощения икосаэдрических кластеров, содержащих 147 атомов Ag, характеризуются наличием расположенного вблизи 4.65 эВ пика, существование которого обусловлено присутствием внутризонных переходов, а также их взаимодействием с локализованным поверхностным плазмонным резонансом [28]. Примерное значение диаметра D таких частиц, оцененное с использованием сферической модели [29], составляет 0.75 нм. Результат подтверждается проведенными авторами ранее исследованиями спектров комбинационного рассеяния функционализированных серебром слоев пористого кремния [30], в ходе которых также были получены данные о наличии на поверхности матрицы наночастиц Ag соответствующего размера.

При увеличении плотности тока анодирования от 2 до 30 mA/cm^2 подавление в полосе со средней длиной волны 367.5 нм растет, а в полосе с $\lambda_0 = 265.5 \text{ нм}$ – снижается (на $\approx 1.48 \text{ дБ}$) (рис. 9). В свою очередь увеличение продолжительности травления исходной кремниевой матрицы приводит к росту подавления сигнала в полосе с $\lambda_0 = 265.5 \text{ нм}$ (на $\approx 1.44 \text{ дБ}$) (рис. 10). Таким образом, увеличение плотности тока анодирования на этапе создания матрицы из пористого кремния, предположительно, приводит к формированию структуры поверхности пористого кремния, способствующей образованию регулярного массива наночастиц серебра, по форме близких к сферическим, в процессе функционализации.

Рассмотренный механизм позволяет за счет соответствующего изменения условий синтеза управлять интенсивностью поглощения в обеих полосах (367.5 и 265.5 нм) посредством создания плазмонных массивов наночастиц металлов, контролируемых как с точки зрения морфологии наночастиц, так и периода самого массива.

Необходимо отметить, что для целей реализации оптических фильтров достигнутый уровень подавления в полосе (примерно 3 дБ) не может считаться достаточным, однако реализованная технология позволяет синтезировать регулярные плазмонные массивы наночастиц серебра, характеризующиеся сниженным разбросом по размерам отдельных элементов и менее выраженной фрактальностью агрегатов при использовании более высокой плотности тока анодирования исходной кремниевой матрицы. Кроме того, применение разработанной технологии привело к существенному сужению полосы поглощения (до значений ширины на полувысоте $\Delta\lambda \approx 90 \text{ нм}$) по сравнению с существующими прототипами плазмонных фильтров электромагнитных сигналов ($\Delta\lambda \approx 130 \text{ нм}$) [31].

Модификация условий синтеза матрицы пористого кремния позволяет создавать на ее поверхности характеризующиеся необходимыми параметрами с точки зрения форм, морфологий и используемых материалов плазмонные наномассивы, обеспечивая значительный уровень подавления входного сигнала на длинах волн от 200 до 1600 нм [25], позволяя тем самым регулировать среднюю длину волны в полосе подавления заграждающего фильтра (λ_0) в широком спектральном диапазоне.

Заключение. Разработан прототип полосно-заграждающего фильтра на основе функционализированной магнитными наночастицами Fe_mO_n ксерогелевой матрицы SiO_2 . Анализ результатов исследования полученного композиционного материала методом спектроскопии оптического поглощения позволяет связать природу обнаруженных в спектре поглощения прототипа полос с образованием на поверхности пористой матрицы SiO_2 наночастиц Fe_mO_n шести характерных размеров, количественная оценка которых была произведена с использованием теории Г. Ми. Разработанный прототип заграждающего фильтра на основе $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{--SiO}_2$ обладает рядом недостатков, в том числе недостаточной точностью задания средней длины волны, а также трудоемкостью уменьшения неравномерности в полосе поглощения.

Реализован прототип полосно-заграждающего фильтра на основе локализованного поверхностного плазмонного резонанса в композиционных наноструктурированных слоях ПК-Ag, характеристики затухания которого исследованы методом электронной абсорбционной спектроскопии. Прототип характеризуется наличием двух полос

поглощения, расположенных на средних длинах волн 367.5 и 265.5 нм. Существование полосы на $\lambda_0 = 367.5$ нм обусловлено эффектом локализованного поверхностного плазмонного резонанса в массиве наночастиц серебра, по форме близких к сферическим. Возбуждение плазмонов в квантовых кластерах серебра приводит к появлению полосы поглощения на $\lambda_0 = 265.5$ нм. Несмотря на то, что уже на текущий момент разработанный прототип плазмонного фильтра сравним, а по ряду характеристик превосходит как современные интерференционные фильтры (по диапазону допустимых значений средней длины волны), так и аналоги среди существующих плазмонных фильтров (ширина полосы поглощения), необходимы дальнейшие исследования в области совершенствования и создания новых технологий изготовления подложек из пористого кремния и их функционализации. Они позволят синтезировать однородные монодисперсные массивы наночастиц на поверхности, способствуя, таким образом, дальнейшему улучшению характеристик приборов, в том числе снижению неравномерности в полосе поглощения.

Авторский вклад

Смердов Ростислав Сергеевич – измерения оптических спектров (характеристик затухания), анализ и интерпретация данных.

Спивак Юлия Михайловна – методология исследования, синтез прототипов, SEM-измерения.

Мошников Вячеслав Алексеевич – постановка научной проблемы, общие указания по математическому обеспечению задачи, обсуждение результатов.

Мустафаев Александр Сеит-Умерович – постановка научной проблемы, общие указания, обсуждение результатов.

Author's contribution

Rostislav S. Smerdov, optical spectra (attenuation characteristics) measurements, data analysis and interpretation.

Yulia M. Spivak, methodology of investigation, synthesis of the prototypes, SEM measurements.

Vyacheslav A. Moshnikov, statement of a scientific problem, general guidance on the mathematical support of the problem, discussion of the results.

Alexander S. Mustafaev, statement of a scientific problem, general guidance, discussion of results.

Список литературы

1. 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. G. Zhuravskii, V. A. Moshnikov, K. Bepalova, P. A. Somov, Yu. M. Zhukov, A. S. Komolov, L. V. Chistyakova, N. Yu. Grigor'eva // Technical Physics. 2018. Vol. 63. P. 1352–1360. doi: 10.1134/S1063784218090207

2. The Multisensor Array Based on Grown-On-Chip Zinc Oxide Nanorod Network for Selective Discrimination of Al-

cohol Vapors at Sub-ppm Range / A. Bobkov, A. Varezchnikov, I. Plugin, F. S. Fedorov, V. Trouillet, U. Geckle, M. Sommer, V. Goffman, V. Moshnikov, V. Sysoev // Sensors. 2019. Vol. 19, № 19. P. 1–13. doi: 10.3390/s19194265

3. Bobkov A. A., Nalimova S. S., Moshnikov V. A. Fractal structure and electrical properties of percolation sensor layers // Smart Nanocomposites. 2016. Vol. 6, iss. 2. P. 264–265.

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. P. 7494–7497. doi: 10.1016/j.apsusc.2008.06.029

5. Лапшин Б. А. Оптические гетероструктуры. Новая теория и расчет. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 480 с.

6. Chmilenko F., Rastvorova I. Improvement of quality of aluminum ingots at electromagnetic processing // *J. Phys. Conf. Ser.* 2018. Vol. 1118. P. 1–5. doi: 10.1088/1742-6596/1118/1/012030

7. Denisova O., Rastvorova I. Carbon Materials for Immobilization of Biologically Active Substances // *Engineering Materials*. 2020. Vol. 836. P. 52–57. doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.836.52

8. Micromechanics, Nanophysics And Non-Destructive Testing Of The Strength Of Structural Materials / V. Nosov, I. Chaplin, E. Gilyazetdinov, E. Grigoriev, I. Pavlenko // *Mater. Phys. Mech.* 2019. Vol. 42. P. 808–824. doi: 10.18720/MPM.4262019_13

9. Shpenst V. A. Investigation of the State Of Materials of Power Lines by Multispectral Optical-Electronic Devices // *Iop Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2019. Vol. 378. P. 1–5. doi: 10.1088/1755-1315/378/1/012072

10. Shpenst V. A. Complexation of Telecommunications and Electrical Systems in Mines and Underground Facilities // *J. Min. Inst.* 2019. Vol. 235. P. 78–87. doi: 10.31897/PMI.2019.1.78

11. Multilevel Model of Time Dependences of Acoustic Emission Parameters as The Basis for Nanodiagnostics of The State of Technical Objects / V. V. Nosov, A. P. Artyushchenko, S. A. Peretyatko, E. D. Khokhlova // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. Vol. 1582. P. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/1582/1/012067

12. Fabrication of oxide heterostructures for promising solar cells of a new generation / A. A. Bobkov, N. A. Lashkova, A. I. Maximov, V. A. Moshnikov, S. S. Nalimova // *Semiconductors*. 2017. Vol. 51, iss. 1. P. 61–65. doi: 10.1134/S1063782617010031

13. Nano-size effects in graphite/graphene structure exposed to cesium vapor / A. S. Mustafaev, V. I. Yarygin, V. S. Soukhomlinov, A. B. Tsyganov, I. D. Kaganovich // *J. of Applied Physics*. 2018. Vol. 124, iss. 12. P. 1–10. doi: 10.1063/1.5037028

14. Rhombic silver nanoparticles array-based plasmonic filter / Y. Q. Fu, S. L. Zhu, X. L. Zhou, W. Zhao // *Intern. J. of Modern Physics B*. 2011. Vol. 25. P. 2557–2566. doi: 10.1142/S021797921101168

15. A tunable optical filter / J. Philip, T. Jaykumar, P. Kalyanasundaram, B. Raj // *Measurement Science and Technology*. 2003. Vol. 14, iss. 8. P. 1289–1294. doi: 10.1088/0957-0233/14/8/314

16. Tunable magneto-optical wavelength filter of long-period fiber grating with magnetic fluids / T. Liu, X. Chen, Z. Di, J. Zhang, X. Li, J. Chen // *Applied Physics Lett.* 2007. Vol. 91, iss. 12. P. 1–3. doi: 10.1063/1.2787970

17. Gareev K. G., Nepomnyashchaya E. K. Obtaining and Characterizing a Water-Based Magnetic Fluid // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2019. Vol. 83, iss. 7. P. 904–905. doi: 10.3103/S1062873819070177

18. Spectroscopic Properties of γ -irradiated $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{-SiO}_2$ Composite Nanoparticles / R. S. Smerdov, T. V. Bocharova, V. S. Levitskii, E. I. Terukov, K. G. Gareev, V. A. Moshnikov // *Physics of the Solid State*. 2016. Vol. 58, iss. 5. P. 919–923. doi: 10.1134/S1063783416050243

19. UV-Vis Band-Stop Filter Based on Plasmon Resonance for Fluorescent Microscopic Applications / R. Smerdov, V. Loboda, Y. Spivak, V. Moshnikov // *St Petersburg State Polytechnical University J. Computer Science. Telecommunications and Control Systems*. 2016. Vol. 247, iss. 3. P. 13–22. doi: 10.5862/jcstcs.247.2

20. Unno H., Imai K., Muramoto S. Dissolution Reaction Effect on Porous-Silicon Density // *J. of the Electrochemical Society*. 1987. Vol. 243, iss. 24. P. 358–362.

21. Levy P. The Kinetics of Gamma-Ray Induced Coloring of Glass // *J. of the American Ceramic Society*. 2006. Vol. 43, № 8. P. 389–395. doi: 10.1111/j.1151-2916.1960.tb13680.x

22. Kreibig U. Small Silver Particles in Photosensitive Glass: Their Nucleation and Growth // *Appl. Phys.* 1976. Vol. 10, № 3. P. 255–264.

23. Gareev K. G., Luchinin V. V., Moshnikov V. A. Magnetic Nanomaterials Obtained by Chemical Methods // *Biotechnosfera*. 2013. № 5 (29). P. 2–13.

24. Nepomnyashchaya E., Aksenov E., Velichko E. Molecular Dynamics as Studied by Laser Correlation Spectroscopy // *Proc. of 38th Progress in Electromagnetics Research Symp., St Petersburg, SPbGU, St Petersburg*, 2017. P. 3556–3562. doi: 10.1109/PIERS.2017.8262375

25. Mayergoyz I. D. Plasmon Resonances in Nanoparticles. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte. Ltd., 2013. Vol. 6. 325 p.

26. Bernard S., Kutter J. P., Mogensen K. B. Plasmon enhanced silver quantum cluster fluorescence for biochemical applications // *TechConnect Briefs*. 2014. Vol. 2. P. 443–446.

27. Rabilloud F. Description of plasmon-like band in silver clusters: The importance of the long-range Hartree-Fock exchange in time-dependent density-functional theory simulations // *The J. of Chemical Physics*. 2014. Vol. 141, iss. 14. P. 1–9. doi: 10.1063/1.4897260

28. Weissker H., Lopez-Lozano X. Surface plasmons in quantum-sized noble-metal clusters: TDDFT quantum calculations and the classical picture of charge oscillations // *Phys. Chemistry Chem. Phys.* 2015. Vol. 17, iss. 42. P. 28379–28386. doi: 10.1039/C5CP01177A

29. Mori T., Hegmann T. Determining the composition of gold nanoparticles: a compilation of shapes, sizes, and calculations using geometric considerations // *J. of Nanoparticle Research*. 2016. Vol. 18, iss. 10. P. 1–36. doi: 10.1007/s11051-016-3587-7

30. The characterisation of nanostructured porous silicon/silver layers via Raman spectroscopy / R. S. Smerdov, Y. M. Spivak (Kanageeva), V. S. Levitsky, V. A. Moshnikov // *J. of Physics Conf. Series*. 2018. Vol. 1038. P. 1–4. doi: 10.1088/1742-6596/1038/1/012064

31. Optically tunable plasmonic color filters / Y. J. Liu, G. Y. Si, E. S. P. Leong, B. Wang, A. J. Danner, X. C. Yuan, J. H. Teng // *Applied Physics A*. 2012. Vol. 107, iss. 1. P. 49–54. doi: 10.1007/s00339-011-6736-y

Информация об авторах

Смердов Ростислав Сергеевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 "Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий", Санкт-Петербургский горный университет. Автор более 30 научных работ, в том числе 14 работ, индексируемых в международных базах данных Scopus и WoS (1 в журнале Q2). Сфера научных интересов – наноэлектроника, эмиссия электронов и механизмы взаимодействия света с веществом.

Адрес: Санкт-Петербургский горный университет, Васильевский остров, 21-я линия, д. 2, Санкт-Петербург, 199106, Россия

E-mail: rostofan@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8648-5712>

Спивак Юлия Михайловна – к. ф.-м. н. (2009), доцент (2015), доцент кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 170 научных работ. Сфера научных интересов – характеристика наноматериалов, тераностика, тонкопленочные нанотехнологии.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

E-mail: ymkanageeva@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5852-999X>

Мошников Вячеслав Алексеевич – д. ф.-м. н. (1997), профессор (1999), зам. заведующего кафедрой микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 450 научных работ. Сфера научных интересов – нанотехнология и диагностика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

E-mail: vamoshnikov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6500-5492>

Мустафаев Александр Сеит-Умерович – д. ф.-м. н. (2004), профессор (2006), заведующий кафедрой общей и технической физики Санкт-Петербургского горного университета, член Американского Физического общества, действительный член Международной АН экологии, безопасности человека и природы. Автор более 160 научных публикаций. Сфера научных интересов – плазменная энергетика и новые разработки по плазменным нанотехнологиям.

Адрес: Санкт-Петербургский горный университет, Васильевский остров, 21-я линия, д. 2, Санкт-Петербург, 199106, Россия

E-mail: alexmustafaev@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2554-8526>

References

1. Spivak Yu. M., Belorus A. O., Panevin A. A., Zhuravskii S. G., Moshnikov V. A., Bespalova K., Somov P. A., Zhurkov Yu. M., Komolov A. S., Chistyakova L. V., Grigor'eva N. Yu. 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

2. Bobkov A., Varezchnikov A., Plugin I., Fedorov F. S., Trouillet V., Geckle U., Sommer M., Goffman V., Moshnikov V., Sysoev V. The Multisensor Array Based on Grown-On-Chip Zinc Oxide Nanorod Network for Selective Discrimination of Alcohol Vapors at Sub-ppm Range. *Sensors*. 2019, vol. 19, no. 19, pp. 1–13. doi: 10.3390/s19194265

3. Bobkov A. A., Nalimova S. S., Moshnikov V. A. Fractal structure and electrical properties of percolation sensor layers. *Smart Nanocomposites*. 2016, vol. 6, iss. 2, pp. 264–265.

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, pp. 7494–7497. doi: 10.1016/j.apsusc.2008.06.029

5. Lapshin B. A. *Opticheskie geterostrukтуры. Novaya teoriya i raschet [Optical heterostructures. New theory and calculation]*. SPb, BKhV-Peterburg, 2012, 480 p. (In Russ.)

6. Chmilenko F., Rastvorova I. Improvement of Quality of Aluminum Ingots At Electromagnetic Processing. *J. Phys. Conf. Ser.* 2018, vol. 1118, pp. 012030-1–012030-5. doi:10.1088/1742-6596/1118/1/012030

7. Denisova O., Rastvorova I. Carbon Materials for Immobilization of Biologically Active Substances. *Key Eng. Mater.* 2020, vol. 836, pp. 52–57. doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.836.52

8. Nosov V., Chaplin I., Gilyazetdinov E., Grigoriev E., Pavlenko I. Micromechanics, Nanophysics And Non-Destructive Testing Of The Strength Of Structural Materials. *Mater. Phys. Mech.* 2019, vol. 42, pp. 808–824. doi:10.18720/MPM.4262019_13
9. Shpenst V. Investigation of The State Of Materials of Power Lines By Multispectral Optical-Electronic Devices. *Iop Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2019, vol. 378, pp. 1–5. doi: 10.1088/1755-1315/378/1/012072
10. Shpenst V. Complexation of Telecommunications And Electrical Systems In Mines And Underground Facilities. *J. Min. Inst.* 2019, vol. 235, pp. 78–87. 10/31897/PMI.2019.1.78
11. Nosov V., Artyushchenko A., Peretyatko S., Khokhlova E. Multilevel Model of Time Dependences of Acoustic Emission Parameters As The Basis For Nanodiagnosics of The State Of Technical Objects. *J. Phys. Conf. Ser.* 2020, vol. 1582, pp. 1–6. doi:10.1088/1742-6596/1582/1/012067
12. Bobkov A. A., Lashkova N. A., Maximov A. I., Moshnikov V. A., Nalimova S. S. Fabrication of oxide heterostructures for promising solar cells of a new generation. *Semiconductors.* 2017, vol. 51, no. 1, pp. 61–65. doi: 10.1134/S1063782617010031
13. Mustafaev A. S., Soukhomlinov V. S., Yarygin V. I., Tsyganov A. B., Kaganovich I. D. Nano-size effects in graphite/graphene structure exposed to cesium vapor. *J. of Applied Physics.* 2018, vol. 124, no. 12, pp. 1–10. doi: 10.1063/1.5037028
14. Fu Y. Q., Zhu S. L., Zhou X. L., Zhao W. Rhombic silver nanoparticles array-based plasmonic filter. *Intern. J. of Modern Physics B.* 2011, vol. 25, pp. 2557–2566. doi: 10.1142/S021797921101168
15. Philip J., Jaykumar T., Kalyanasundaram P., Raj B. A tunable optical filter. *Measurement Science And Technology.* 2003, vol. 14, pp 1289–1294. doi: 10.1088/0957-0233/14/8/314
16. Liu T., Chen X., Di Z., Zhang J., Li X., Chen J. Tunable magneto-optical wavelength filter of long-period fiber grating with magnetic fluids. *Applied Physics Lett.* 2007, vol. 91, pp. 1–3. doi: 10.1063/1.2787970
17. Gareev K. G., Nepomnyashchaya E. K. Obtaining and Characterizing a Water-Based Magnetic Fluid. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* 2019, vol. 83, no. 7, pp. 904–905. doi: 10.3103/S1062873819070177
18. Smerdov R. S., Bocharova T. V., Levitskii V. S., Terukov E. I., Gareev K. G., Moshnikov V. A. Spectroscopic Properties of γ -irradiated FemOn-SiO₂ Composite Nanoparticles. *Physics of the Solid State.* 2016, vol. 58, no. 5, pp. 919–923.
19. Smerdov R., Loboda V., Spivak Y., Moshnikov V. UV-Vis Band-Stop Filter Based on Plasmon Resonance for Fluorescent Microscopic Applications. *St Petersburg State Polytechnical University J. Computer Science. Telecommunications and Control Systems.* 2016, vol. 247, no. 3, pp. 13–22. doi: 10.5862/jcstcs.247.2
20. Unno H., Imai K., Muramoto S. Dissolution Reaction Effect on Porous-Silicon Density. *J. of the Electrochemical Society.* 1987, vol. 243, no. 24, pp. 358–362. doi: 10.1149/1.2100524
21. Levy P. The Kinetics of Gamma-Ray Induced Coloring of Glass. *J. of The American Ceramic Society.* 2006, vol. 43, no. 8, pp. 389–395. doi: 10.1111/j.1151-2916.1960.tb13680.x
22. Kreibig U. Small Silver Particles in Photosensitive Glass: Their Nucleation and Growth. *Appl. Phys.* 1976, vol. 10, no. 5, pp. 255–264. doi: 10.1007/BF00897225
23. Gareev K. G., Luchinin V. V., Moshnikov V. A. Magnetic Nanomaterials Obtained by Chemical Methods. *Biotechnosfera [Biotechnosphere].* 2013, no. 5 (29), pp. 2–13. (In Russ.)
24. Nepomnyashchaya E., Aksenov E., Velichko E. Molecular Dynamics as Studied by Laser Correlation Spectroscopy. *Proc. of 38th Progress in Electromagnetics Research Symp. St Petersburg, 22–25 May 2017. St Petersburg State University, 2017, pp. 3556–3562. doi: 10.1109/PIERS.2017.8262375*
25. Mayergoyz I. D. Plasmon Resonances in Nanoparticles. Singapore, World Scientific Publishing Co Pte. Ltd., 2013, vol. 6, 325 p.
26. Bernard S., Kutter J. P., Mogensen K. B. Plasmon enhanced silver quantum cluster fluorescence for biochemical applications. *TechConnect Briefs.* 2014, vol. 2, pp. 443–446.
27. Rabilloud F. Description of plasmon-like band in silver clusters: The importance of the long-range Hartree-Fock exchange in time-dependent density-functional theory simulations. *The J. of Chemical Physics.* 2014, vol. 141, pp. 1–9. doi: 10.1063/1.4897260
28. Weissker H., Lopez Lozano X. Surface plasmons in quantum-sized noble-metal clusters: TDDFT quantum calculations and the classical picture of charge oscillations. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2015, vol. 17, pp. 28379–28386. doi: 10.1039/C5CP01177A
29. Mori T., Hegmann T. Determining the composition of gold nanoparticles: a compilation of shapes, sizes, and calculations using geometric considerations. *J. of Nanoparticle Research.* 2016, vol. 18, pp. 1–36. doi: 10.1007/s11051-016-3587-7
30. Smerdov R. S., Spivak Y. M., Levitsky V. S., Moshnikov V. A. The characterisation of nanostructured porous silicon/silver layers via Raman spectroscopy. *J. of Physics Conference Series.* 2018, vol. 1038, pp. 1–4. doi: 10.1088/1742-6596/1038/1/012064
31. Liu Y. J., Si G. Y., Leong E. S. P. Optically tunable plasmonic color filters. *Applied Physics A.* 2012, vol. 107, pp. 49–54. doi: 10.1007/s00339-011-6736-y

Information about the authors

Rostislav S. Smerdov, Applicant for the degree of Cand. Sci. (Eng.) in the specialty 05.11.13 Instruments and methods for monitoring the natural environment, substances, materials and products, St. Petersburg Mining University. The author of more than 30 scientific publications including 14 papers indexed in the international databases Scopus and WoS (1 paper in Q2 journal). Area of expertise: nanoelectronics, electron emission and interaction of light with matter.

Address: Saint Petersburg Mining University, 2, 21 Line St., St Petersburg 199106, Russia

E-mail: rostofan@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8648-5712>

Yulia M. Spivak, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2009), Assistant professor (2015), assistant professor at the Micro- and Nanoelectronics Department of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 170 scientific publications. Area of expertise: characterization of nanomaterials, theranostics, thin-film nanotechnology.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: ymkanageeva@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5852-999X>

Vyacheslav A. Moshnikov, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (1997), professor (1999), Deputy Head of the Micro- and Nanoelectronics Department of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 450 scientific publications. Area of expertise: nanotechnology and diagnostics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: vamoshnikov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6500-5492>

Alexander S. Mustafaev, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (2004), Head of the General and Applied Physics Department of Saint Petersburg Mining University, Member of the American Physical Society. The author of more than 160 scientific publications. Area of expertise: plasma energy and new developments in plasma nanotechnology.

Address: Saint Petersburg Mining University, 2, 21 Line St., St Petersburg 199106, Russia

E-mail: alexmustafaev@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2554-8526>

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

УДК 504.064

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-98-108>

Разработка макета распределенной сенсорной системы экологического мониторинга

Е. А. Севрюкова¹, Е. А. Волкова¹, В. А. Дорошенко², А. В. Солодков¹✉

¹Национальный исследовательский университет "МИЭТ", Москва, Россия

²АО "ПКК Миландр", Москва, Россия

✉ solodkov_aw@mail.ru

Аннотация

Введение. Рассмотрены основные принципы осуществления экологического мониторинга; проанализированы возможности построения сенсорных систем для осуществления этой задачи. В качестве протокола беспроводной связи создаваемой системы экомониторинга предложено использование телекоммуникационного стандарта с низким энергопотреблением NB-IoT, обеспечивающего эффективное сетевое взаимодействие устройств сети. Проведено моделирование системы и макетирование алгоритмов приема и передачи сигналов.

Цель работы. Построить макет приемопередатчика по стандарту NB-IoT и провести его имитационное моделирование. Использовать маршрут создания системы с формированием ее цифрового двойника в MatLab.

Материалы и методы. Прототип построен с использованием отладочной платы Xilinx Zedboard и приемопередатчика на основе микросхемы AD9361, а имитационная модель – при помощи пакета программ MatLab 2010.

Результаты. Получены результаты имитационного моделирования в канале с аддитивным белым гауссовым шумом, определена мощность обнаруживаемых сигналов синхронизации стандарта NB-IoT. Приемник и передатчик стандарта NB-IoT реализованы на плате Xilinx Zedboard. Временные диаграммы, полученные в ходе тестирования макета, демонстрируют, что разработанная система готова к тестированию в реальной среде. Определены энергетические и ресурсные затраты разработанного макета узла беспроводной сенсорной сети.

Заключение. Полученные результаты моделирования показывают, что разработанная модель системы связи функционирует корректно и формируемый сигнал передатчика соответствует требованиям стандарта NB-IoT. Результаты разработки можно использовать для создания отечественной микросхемы узла сбора и передачи данных мониторинга окружающей среды.

Ключевые слова: системы мониторинга окружающей среды, сенсорные сети, быстрое прототипирование, ПЛИС, интернет вещей, NB-IoT

Для цитирования: Разработка макета распределенной сенсорной системы экологического мониторинга / Е. А. Севрюкова, Е. А. Волкова, В. А. Дорошенко, А. В. Солодков // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 3. С. 98–108. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-98-108

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке центра НТИ "Сенсорика" в НОЦ РЦСС НИУ МИЭТ в рамках проекта "Создание автоматизированной системы мониторинга окружающей среды (АСМОС) для сбора, обработки, хранения и передачи метеорологической и экологической информации", рег. № НИОКТР: АААА-А20-1200130090100-3.

Статья поступила в редакцию 26.03.2021; принята к публикации после рецензирования 20.04.2021; опубликована онлайн 29.06.2021



Medical Devices and Devices for Control of the Environment, Substances,
Materials and Products

Original article

A Prototype Unit of a Distributed Sensor System for Ecological Monitoring

Elena A. Sevryukova¹, Elena A. Volkova¹,
Vladislav A. Doroshenko², Alexey V. Solodkov¹✉

¹National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

²MILANDR GROUP, Moscow, Russia

✉solodkov_aw@mail.ru

Abstract

Introduction. In this article, the basic principles of ecological monitoring were considered, and the possibilities of constructing sensor systems were analysed. It was proposed to use the NB-IoT low-energy telecommunication standard as a basic wireless protocol for ecological system development, which ensures effective communication of network devices. A prototype of the system was constructed, and algorithms for receiving and transmitting signals were simulated.

Aim. To construct a prototype of a transceiver based on the NB-IoT standard and perform its simulation. To utilize digital twin in MatLab to create the proposed system.

Materials and methods. The prototype was constructed using the Xilinx Zedboard evaluation board and transceiver on AD9361 chip, and the simulation was performed using the MatLab 2010 software package.

Results. The results of the simulation in the channel with the additive white Gaussian noise (AWGN) were obtained, and the level of the detected synchronization signals of the NB-IoT standard was determined. The receiver and transmitter of the NB-IoT standard were implemented on the Xilinx Zedboard evaluation board. The timing simulation results show that the designed system can be tested in a real environment. The power consumption and resource utilization of the constructed wireless sensor network prototype unit were determined.

Conclusion. The results obtained via the simulation process show that the designed prototype of the communication system works correctly, and the produced signal meets all the requirements of the NB-IoT standard. The results can be used for creating a domestic manufactured, specialized integrated chip for data units of ecological monitoring systems.

Keywords: ecological monitoring system, sensor networks, rapid prototyping FPGA, IoT, NB-IoT

For citation: Sevryukova E. A., Volkova E. A., Doroshenko V. A., Solodkov A. V. A Prototype Unit of a Distributed Sensor System for Ecological Monitoring. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 3, pp. 98–108. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-98-108

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

Source of financing. The research was carried out with the financial support of the Center for Scientific and Technical Information "Sensorika" NIU MIET NOTS RTSSS within the project "Creation of an automated environmental monitoring system (ASMOS) for the collection, processing, storage and transmission of meteorological and environmental information", Project No. AAAA-A20-1200130090100-3.

Submitted 26.03.2021; accepted 20.04.2021; published online 29.06.2021

Введение. В настоящее время стремительно развиваются информационно-коммуникационные технологии. Это связано, прежде всего, с повышением востребованности услуг по обмену и обработке различных видов информации. Одной из наиболее перспективных областей в сфере сбора, анализа, обработки, хранения и передачи данных являются беспроводные сенсорные сети (БСС), общее видение которых обычно связано с единой

концепцией интернета вещей (Internet of Things – IoT). Актуальность IoT обусловлена интеллектуализацией таких объектов, как дом, офис, производственное помещение, а также автоматизацией производств посредством внедрения технологий сбора данных.

В настоящий момент имеется большое количество сенсорных систем, интегрирующих в себе как сенсорные технологии, так и обработку сигналов,

хранение данных и сетевые возможности. В условиях, когда вследствие стремительного промышленного развития приобретают первостепенное значение вопросы охраны окружающей среды, а также рационального использования природных ресурсов, критически важным параметром для построения сенсорных сетей, развернутых, в частности, для метео- и экомониторинга, является энергоэффективность составляющих их устройств.

Поскольку ключевой функциональной возможностью БСС является осуществление эффективного сетевого взаимодействия, актуальна задача создания систем контроля и наблюдения за параметрами окружающей среды с применением современных телекоммуникационных решений, позволяющих достичь минимального энергопотребления устройств на их основе.

В настоящей статье рассмотрена реализация системы информационного взаимодействия для обеспечения централизованного сбора, обработки и передачи информации в сенсорной системе с использованием стандарта связи с низким энергопотреблением.

Анализ экологических систем мониторинга параметров окружающей среды. Природная среда представляет собой сложную систему, состояние которой подвержено непрерывным изменениям. Эти изменения различны по своей направленности и величине, неравномерно распределены во времени и в пространстве. Вместе с тем, воздействие человека на окружающую среду вследствие стремительного технологического развития требует лучшего понимания процессов и взаимосвязей между элементами внутри этой среды. Ключ к такому пониманию – использование систем мониторинга окружающей среды, основными функциями которых являются наблюдение за экологической системой конкретного региона во времени и пространстве, отслеживание качества экологической среды по изменению основных параметров, оценка и прогнозирование влияния деятельности человека на экологическую систему.

Цели создания и развития систем экологического мониторинга – максимально полная информационная поддержка управленческих решений в сфере охраны и оздоровления окружающей среды, интеграция экологической информации, получаемой различными ведомствами, и внедрение современных расчетно-аналитических методов для комплексной оценки состояния окружающей среды [1].

Область применения экологических систем мониторинга обширна [2, 3]. На сегодняшний день

наиболее важными являются прогнозирование погодных условий [4, 5], контроль загрязнений воздуха и выбросов в атмосферу токсичных веществ в городской среде и промышленных зонах [6, 7], а также улучшение систем сельскохозяйственного производства [8–10].

Загрязнение воздуха – серьезная экологическая проблема для большинства крупных городов мира. Выбросы токсичных веществ промышленных предприятий и мусорных полигонов оказывают существенное негативное воздействие на природную среду, а также на здоровье и качество жизни людей. Увеличение числа подобных промышленных объектов ведет к росту вероятности аварийных случаев загрязнения окружающей среды, в особенности загрязнения воздуха. В течение определенного периода времени после происшествия вследствие метеорологических и географических условий загрязнение воздуха может сохранять свою интенсивность, что приводит к большому экологическому ущербу. В таких случаях особенно важно использовать системы мониторинга параметров воздушной среды, работающие в режиме реального времени.

Общая система мониторинга и контроля за промышленными предприятиями и полигонами для захоронения отходов необходима для обеспечения эффективного технического обслуживания и принятия профилактических мер против утечки загрязняющих веществ в окружающую среду.

Быстрое развитие и миниатюризация сенсорных устройств, а также последние достижения в области беспроводной связи и сетевых технологий позволили создавать сети небольших датчиков, которые можно использовать для постоянного мониторинга состояния и стабильности окружающей среды. Структура типовой БСС изображена на рис. 1. Область покрытия подобной сети может составлять от нескольких метров до нескольких километров за счет возможности ретрансляции сообщений от одного узла к другому [12].

Вследствие большой удаленности сенсорных узлов, стремительного роста стоимости обслуживания сети из-за недолговечности аккумуляторных элементов узлов и невозможности их подзарядки существующие системы не подходят для эффективной реализации задачи экомониторинга [13, 14], что приводит к необходимости рассмотрения подкласса систем с очень низким потреблением, в частности, стандарта NB-IoT (Narrowband IoT, узкополосный IoT).

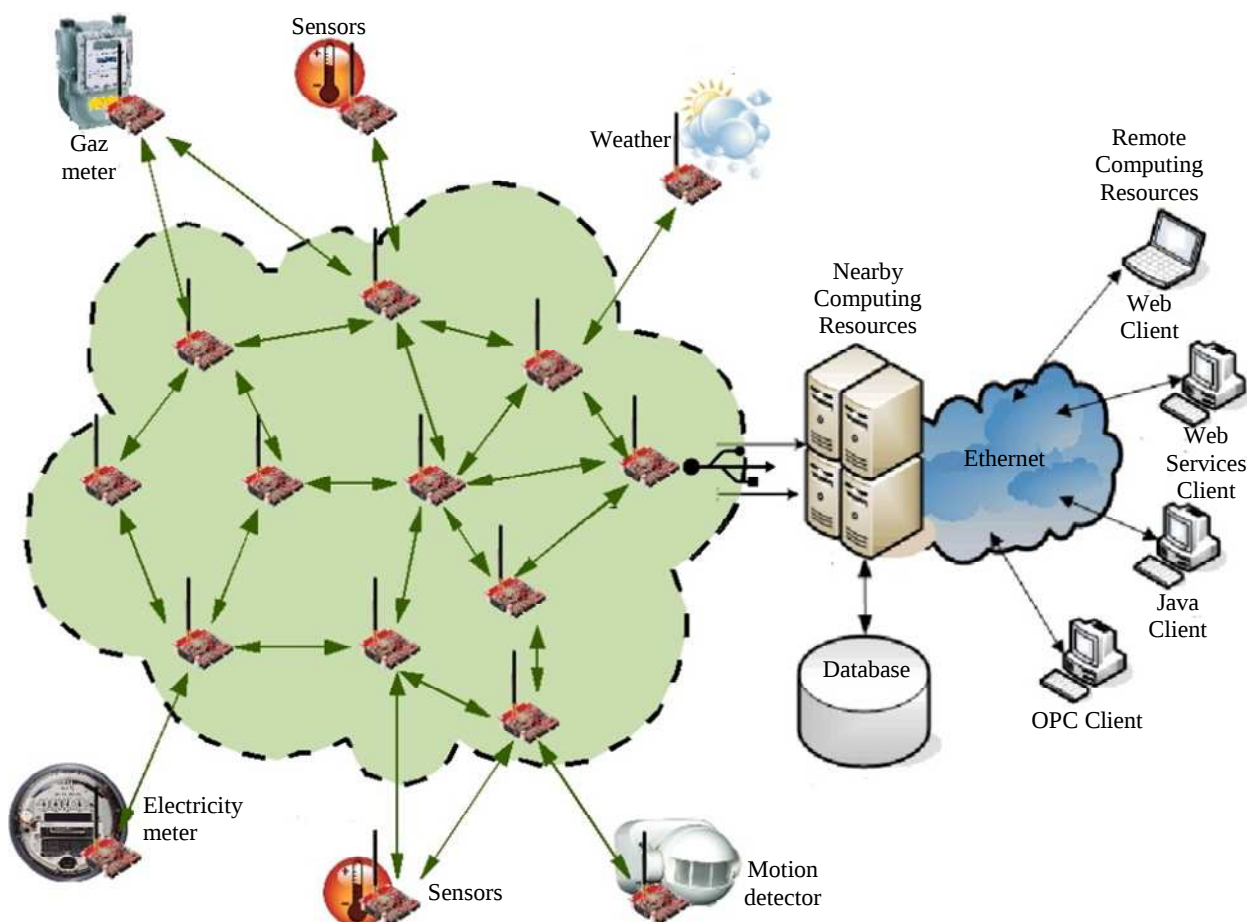


Рис. 1. Пример беспроводной сенсорной сети [11]

Fig. 1. An example of a wireless sensor network [11]

Методы беспроводной связи с низким энергопотреблением. Стандарт NB-IoT, разработанный консорциумом 3GPP, является наиболее перспективной технологией радиочастотного доступа, которая создана для удовлетворения специфических требований IoT. Технология NB-IoT основана на существующих сетях LTE [15]. При этом функциональные возможности сети LTE, не используемые NB-IoT, сводятся к минимуму, а весь ресурс сети отдается для реализации необходимых NB-IoT возможностей. NB-IoT оптимизирован для небольших и нечастых передач данных и позволяет избежать функций, не требующихся для целей IoT, например измерений для контроля качества канала, агрегации несущих и двойного подключения. Поэтому конечным устройствам требуется лишь небольшой запас энергии батареи, что делает стандарт экономически эффективным. В связи с этим NB-IoT-комплекс совместим с существующей инфраструктурой сотовой сети и обладает таким же уровнем безопасности, что и LTE [16].

С точки зрения стека протоколов технология NB-IoT может рассматриваться как новый радиоинтерфейс, построенный на инфраструктуре LTE. NB-IoT использует лицензированный участок спектра и полосу пропускания всего 200 кГц. Он позволяет подключать до 100 000 оконечных устройств на соту с возможностью увеличения емкости добавлением большего количества несущих.

Для передачи данных в NB-IoT применяется частотное разделение каналов с мультиплексированием на одной несущей в восходящей линии (uplink – UL) [17, 18] и множественный доступ с частотным разделением каналов с одной несущей частотой (Single Carrier Frequency Division Multiple Access – SC-FDM) с использованием модуляции QPSK в нисходящей линии (downlink – DL) [19]. В стандарте NB-IoT минимальными структурными составляющими являются так называемые ресурсные блоки (FDM-символы на 6 или 7 поднесущих) длительностью 0.5 мс (один временной интервал). Два временных интервала (таймслота) образуют подкадр, 10 подкадров составляют

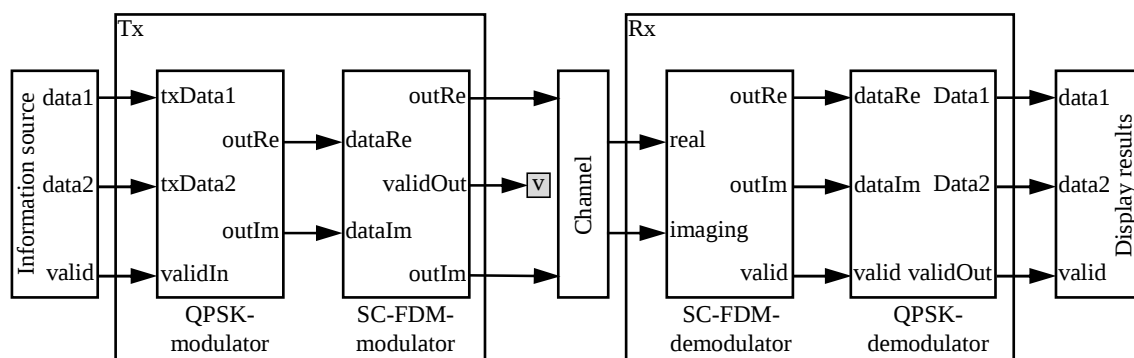


Рис. 2. Блок-схема модели системы связи на базе NB-IoT

Fig. 2. A flow chart of a communication system prototype based on NB-IoT

кадр [18]. Для установления синхронизации с базовой станцией используется двухэтапная схема: один раз в кадр в эфир передаются сигналы первичной синхронизации (primary synchronization signal – PSS) и обеспечивающие уточнение сигналы вторичной синхронизации (secondary synchronization signal – SSS). В качестве обоих сигналов используются последовательности Задова–Чу со сдвигами, которые позволяют однозначно идентифицировать базовую станцию.

Скорость передачи данных ограничена 200 кбит/с в DL и 180 кбит/с в UL. Дальность работы для городских и пригородных районов составляет до 8 и до 25 км соответственно.

Разработка системы информационного взаимодействия. Основу модели разработанной в среде MatLab системы связи на базе NB-IoT (рис. 2) составляют 2 структурных элемента, реализующих алгоритмы цифровой обработки сигналов в передатчике и в приемнике.

Перед преобразованием с использованием метода SC-FDM квадратурно-модулированный сигнал должен быть отображен на ресурсную сетку NB-IoT, представляющую собой матрицу, где строки являются поднесущими, а столбцы – символами UL-кадра SC-FDM. Сетка ресурсов охватывает подкадр (2 временных интервала) во временной области. Размер этого массива составляет $12N_{RB} \times 2N_{symb}$, где N_{RB} – количество ресурсных блоков, охватывающих доступную полосу пропускания; N_{symb} – количество SC-FDM-символов на интервале.

Для проверки алгоритма обработки передающей части системы информационного взаимодействия реализован приемник, выполняющий

обратные преобразования для восстановления исходного сигнала.

В соответствии с требованиями стандарта NB-IoT приняты следующие значения параметров подсистем передающей и приемной частей модели:

- расстояние между поднесущими 15 кГц;
- размер преобразований Фурье 128 точек;
- количество используемых поднесущих 12;
- длина циклического префикса – стандартная;
- частота дискретизации схемы 1.92 МГц;
- полоса частот передаваемого сигнала 180 кГц.

В качестве данных для передачи используется сигнал меандра, отсчеты которого хранятся в системной памяти DDR. После обработки потока данных подсистемой модулятора сигнал поступает в AD9361, где происходит его оцифровка и необходимые преобразования для отправки в эфир.

После сборки и настройки проекта в программном пакете Xilinx Vivado версии 2017.2 [20] были выполнены операции синтеза и имплементации HDL-модели, а также генерация конечной прошивки ПЛИС, которая используется для последующей демонстрации работы узла передачи.

Для управления программируемой логикой в процессор системы на кристалле (СнК) Zynq [21] были загружены основные драйверы и библиотеки, позволяющие взаимодействовать различным компонентам системы, а также написана программа, содержащая инструкции для установленного на отладочную плату модуля радиочастотного трансивера.

Результаты. Рассмотрим полученные на разных этапах моделирования в Simulink зависимости и убедимся, что блок-схема алгоритмов передачи и приема сигнала, реализующая восходящую линию связи стандарта NB-IoT, функционирует корректно.

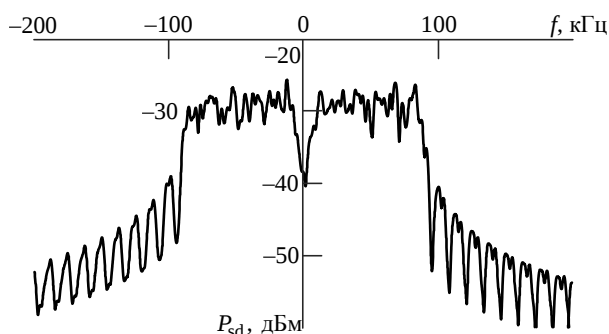


Рис. 3. Спектральная плотность мощности передаваемого сигнала

Fig. 3. The spectral power density of the transmitted signal

Как следует из зависимости спектральной плотности мощности формируемого передатчиком сигнала от частоты (рис. 3), основная мощность сигнала сосредоточена в полосе 180 кГц. Можно заметить сниженную мощность в районе нулевой частоты, соответствующей постоянной составляющей сигнала.

Результаты обнаружения сигнала синхронизации PSS проиллюстрированы на рис. 4. На нем показано изменение уровня взаимной корреляции принимаемого сигнала и искомой последовательности PSS (кривая 1) CC_P в зависимости от номера отсчета входного сигнала. На один символ в модели приходится 2000 отсчетов.

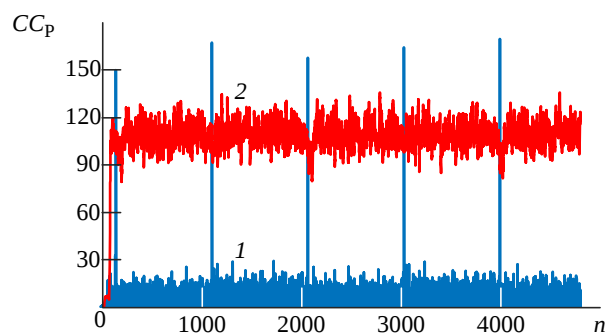


Рис. 4. Обнаружение сигнала синхронизации PSS

Fig. 4. PSS synchronization signal detection

На график также нанесен пороговый сигнал (кривая 2), пропорциональный усредненному значению корреляции. Длина окна усреднения определялась принятым значением вероятности пропуска синхросигнала и при $P_{\text{miss}} = 0.1$ составила 32 отсчета. Пики, превышающие пороговое значение, соответствуют моментам обнаружения конкретной последовательности PSS. На длительность одного SC-OFDM-символа приходится 2 пика, что соответствует передаче PSS дважды в каждом радиочастотном кадре NB-IoT.

На рис. 5 показаны графики, отображающие уровень взаимной корреляции между принимаемым сигналом и SSS. По оси абсцисс указаны условные номера последовательностей SSS (всего используются 167 последовательностей). Для каждого сигнала SSS отображены только максимальные значения взаимной корреляции. Последовательность SSS с максимальной взаимной корреляцией, достигнутой за время вторичной синхронизации, используется для символьной синхронизации и одновременно позволяет определить групповой идентификатор (Group ID – GID) базовой станции. Представленные графики поиска сигналов SSS демонстрируют способность приемной системы осуществлять идентификацию абонентов в сети.

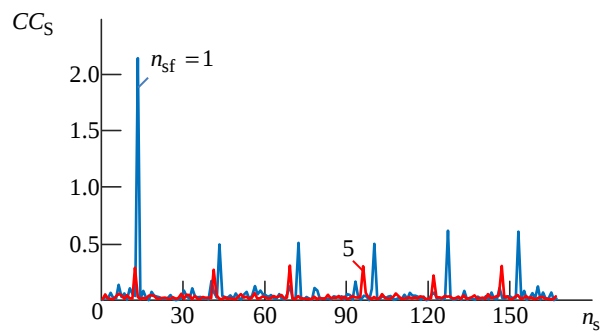


Рис. 5. Взаимная корреляция принятого сигнала и сигналов вторичной синхронизации (SSS) (n_{sf} – номер субкадра)

Fig. 5. Cross-correlation of the received signal and SSS (n_{sf} – subframe number)

Результаты моделирования полученной системы для канала с аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ) представлены на рис. 6, который описывает зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум E_b/N_0 .

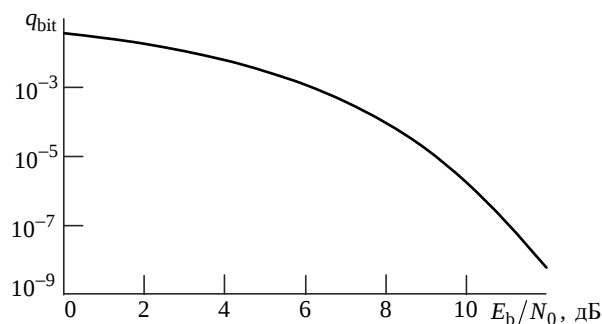


Рис. 6. Вероятности битовой ошибки для канала с АБГШ

Fig. 6. The bit error rate for a channel with Additive White Gaussian Noise (AWGN)

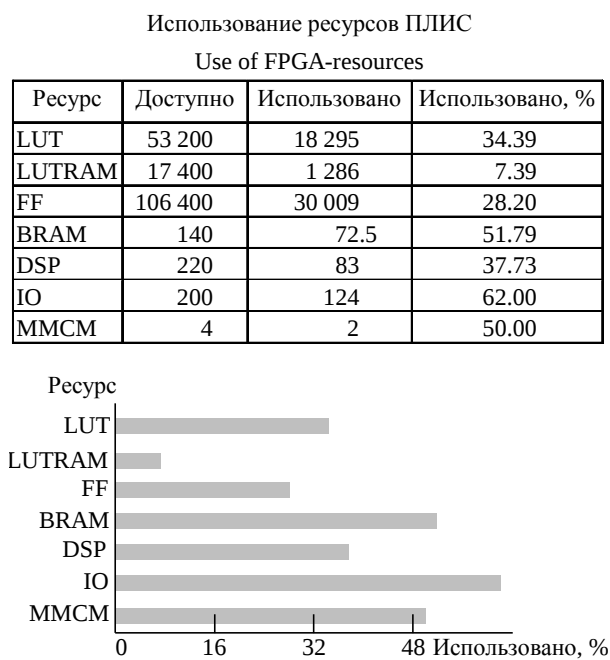


Рис. 7. Использование ресурсов ПЛИС

Fig. 7. Use of FPGA resources

В таблице и на рис. 7 представлен отчет об использовании ресурсов СнК Zynq для разработанного проекта. Необходимо отметить, что при синтезе и имплементации модели Vivado применялись стандартные стратегии их исполнения, направленные на уменьшение времени выполнения синтеза и достижения требуемых временных параметров модели.

Параметр энергопотребления систем экомониторинга играет важнейшую роль при разработке сенсорных систем. Вследствие этого необходимо проанализировать энергетические затраты полученной системы. С помощью функции анализа мощности в Vivado выполнены оценки потребляемой мощности на всех этапах разработки: после синтеза, после размещения компонентов и трассировки соединений.

На рис. 8 представлен сводный отчет о мощности, потребляемой компонентами итогового проекта на этапе трассировки. Как следует из отчета, основная часть энергопотребления приходится на процессорную часть СнК Zynq. Это обусловлено, в первую очередь, отсутствием режима сна, характерного для устройств с небольшими аккумуляторными элементами. После инициализации системы и выполнения программы передачи/приема оборудование продолжает функционировать в стандартном режиме, что значительно повышает потребление энергии платой.

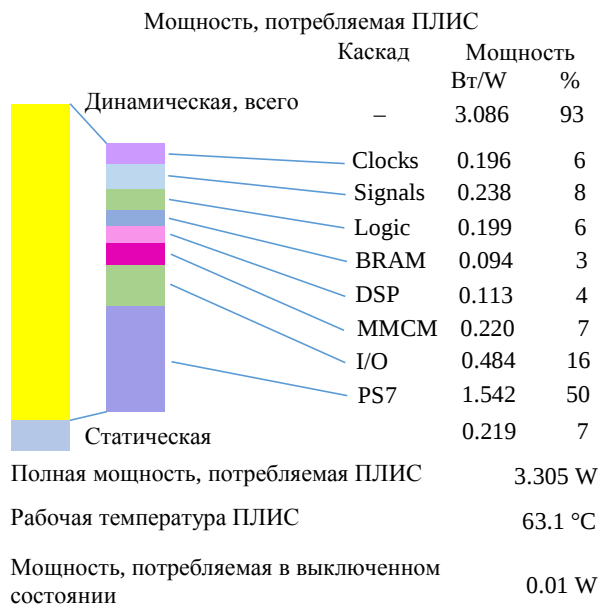


Рис. 8. Отчет о потреблении мощности

Fig. 8. Power consumption report

В итоге результаты моделирования показали правильность функционирования разработанного физического уровня узла сенсорной системы на основе выбранного стандарта NB-IoT. В дальнейшем эти наработки планируется использовать для создания узла сенсорной системы с помощью отечественной компонентной базы, например базовых матричных кристаллов. Поскольку вычислительные ресурсы традиционного телекоммуникационного оборудования значительно превышают ресурсы ПЛИС, для полной реализации функциональных возможностей узла беспроводной сенсорной сети необходимы как более мощная плата, так и проведение оптимизации затрачиваемых ресурсов и энергопотребления, что является планом для дальнейшей работы.

Заключение. В статье рассмотрены возможности систем мониторинга экологических параметров с использованием датчиков, передающих результаты измерения при помощи беспроводной сети. Для увеличения длительности жизни узлов такой сети в качестве радиопотокола передачи данных выбран стандарт со сниженным энергопотреблением (NB-IoT).

Разработана система информационного взаимодействия и проверена ее работоспособность с использованием отладочной платы с радиочастотным модулем. В ходе моделирования изучен спектр сигнала и показана, в частности, возможность устойчивого обнаружения синхросигналов, а в ходе испытания определена вероятность битовой ошибки. Полученные данные доказывают работоспособность созданных алгоритмов.

В результате реализации NB-IoT в ПЛИС оценено энергопотребление системы на стороне абонента. Отчеты САПР Vivado показывают высокий уровень мощности, потребляемой прототипом, в частности процессорным ядром, однако на этапе макета снизить эту мощность невозможно. Вместе с тем, расход мощности созданной цифровой

частью позволяет оценить общий уровень расходов потенциальной микросхемы ASIC. Помимо этого было оценено количество используемых итоговым проектом ресурсов отладочной платы: задействуется лишь часть структурных элементов программируемой логики, что предоставляет возможность для модификации проекта.

Авторский вклад

Севрюкова Елена Александровна – постановка задачи, введение.

Волкова Елена Анатольевна – разработка алгоритмов и архитектуры программного обеспечения, обзор систем экомониторинга.

Дорошенко Владислав Александрович, Солодков Алексей Викторович – моделирование алгоритмов, представление результатов, заключение.

Author's contribution

Elena A. Sevrukova, problem statement, introduction.

Elena A. Volkova, development of algorithms and software architecture, survey of ecological monitoring systems.

Vladislav A. Doroshenko, Alexey V. Solodkov, development and modeling of algorithms, presentation of simulation results and conclusion.

Список литературы

1. A Study on Design Principles of Automatic System for Environment Monitoring / E. A. Sevrukova, E. A. Volkova, N. V. Gubanova, A. V. Solodkov, A. V. Gorelik // 2020 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). St Petersburg and Moscow, 27–30 Jan. 2020. Piscataway: IEEE, 2020. P. 2545–2548. doi: 10.1109/ElConRus49466.2020.9039522

2. Environmental Monitoring Systems: Review and Future Development / I. Šečerov, D. Dolinaj, D. Pavić, D. Milošević, S. Savić, S. Popov, Ž. Živanov // Wireless Engineering and Technology. 2018. Vol. 10, № 1. P. 1–18. doi: 10.4236/wet.2019.101001

3. Othman M. F., Shazali K. Wireless sensor network Applications: A study in environment monitoring System // Procedia Engineering. 2012. Vol. 41. P. 1204–1210. doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.302

4. Shiravale S., Sriram P., Bhagat S. M. Flood Alert System by using Weather Forecasting Data and Wireless Sensor Network // Intern. J. of Computer Applications. 2015. Vol. 124, № 10. P. 14–16. doi: 10.5120/ijca2015905608

5. Wiston M., Mphale K. M. Weather Forecasting: From the Early Weather Wizards to Modern-day Weather Predictions // J. of Climatology & Weather Forecasting. 2018. Vol. 6, № 2. P. 1–9. doi: 10.4172/2332-2594.1000229

6. Ayele T. W., Mehta R. Air Pollution Monitoring and prediction Using IoT // 2018 Second Intern. Conf. on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT). Coimbatore, India, 20–21 April 2018. Piscataway: IEEE, 2018. P. 1741–1745. doi: 10.1109/ICICCT.2018.8473272

7. A Review of Urban Air Pollution Monitoring and Exposure Assessment Methods / X. Xie, I. Semanjski, S. Gautama, E. Tsiligiann, N. Deligiannis, R. T. Rajan, F. Pasveer, W. Philips // ISPRS Intern. J. of Geo-Information. 2017. Vol. 6, № 12. P. 1–21. doi: 10.3390/ijgi6120389

8. A Review of Wireless Sensors and Networks' applications in Agriculture / A. Rehman, A. Z. Abbasi, N. Islam, Z. A. Shaikh // Computer Standards & Interfaces. 2014. Vol. 36, № 2. P. 263–270. doi: 10.1016/j.csi.2011.03.004

9. Agricultural Management through wireless Sensors and Internet of Things / S. Navulur, A. S. C. S. Sastry, M. N. Giri Prasad // Intern. J. of Electrical and Computer Engineering. 2017. Vol. 7, № 6. P. 3492–3499. doi: 10.11591/ijece.v7i6.pp3492-3499

10. Saiz-Rubio V., Rovira-Más F. From Smart Farming towards Agriculture 5.0: a Review on Crop Data Management // Agronomy. 2020. Vol. 10, № 2. P. 1–21. doi: 10.3390/agronomy10020207

11. Mieleveville F., Galos M., Navarro D. Dynamic Reconfiguration for Software and Hardware Heterogeneous Real-time WSN // SENSORCOMM 2012: The Sixth Intern. Conf. on Sensor Technologies and Applications. Rome, Italy, IARIA, 19–24 Aug. 2012. P. 95–100.

12. Имитационное моделирование системы мониторинга окружающей среды / Е. А. Севрюкова, Е. А. Волкова, А. В. Угроватов, М. Д. Копылова // Изв. вузов. Электроника. 2019. Т. 25, № 5. С. 521–529. doi: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-521-529.

13. Node Energy Consumption Analysis in Wireless Sensor Networks / F. Luo, C. Jiang, H. Zhang, X. Wang, L. Zhang,

Y. Ren // IEEE 80th Vehicular Technology Conf. (VTC2014-Fall). Vancouver, Canada, 14–17 Sept. 2014. P. 1–5. doi: 10.1109/VTCFall.2014.6966071

14. Smart City Pilot Projects Using LoRa and IEEE802.15.4 Technologies / G. Pasolini, C. Buratti, L. Feltrin, F. Zabini, C. De Castro, R. Verdone, O. Andrisano // Sensors. 2018. Vol. 18, iss. 4. P. 1118–1134. <https://doi.org/10.3390/s18041118>

15. Fattah H. 5G LTE Narrowband Internet of Things (NB-IoT). Boca Raton: CRC Press, 2019. 262 p. <https://doi.org/10.1201/9780429455056>

16. Paving the path to Narrowband 5G with LTE Internet of Things (IoT) // White Paper, Qualcomm. 2016. 36 p. URL: <https://www.qualcomm.cn/media/documents/files/paving-the-path-to-narrowband-5g-with-lte-iot.pdf> (дата обращения 25.02.2021)

17. A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things

/ Y.-P. E. Wang, X. Lin, A. Adhikary, A. Grovlen, Y. Sui, Y. Blankenship, J. Bergman, H. S. Razaghi // IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55, № 3. P. 117–123. doi: 10.1109/MCOM.2017.1600510CM

18. Dahlman E., Parkvall S., Skold J. 4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G. London: Academic Press, 2016. 616 p.

19. Cellular Internet of things: technologies, standards, and performance / O. Liberg, M. Sundberg, E. Wang, J. Bergman, J. Sachs. London: Academic Press, 2017. 382 p. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01868-5>

20. Тарасов И. Е. ПЛИС Xilinx. Языки описания аппаратуры VHDL и Verilog, САПР, приемы проектирования. М.: Горячая линия–Телеком, 2020. 538 с.

21. The Zynq Book: Embedded Processing with the ARM Cortex-A9 on the Xilinx Zynq-7000 All Programmable SoC / R. A. Elliot, M. A. Enderwitz, C. H. Louise, R. W. Stewart. Glasgow: Strathclyde Academic Media, 2014. 484 p.

Информация об авторах

Севрюкова Елена Александровна – доктор технических наук (2017), профессор, зам. директора Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета "МИЭТ" (НИУ МИЭТ). Автор более 60 научных публикаций. Сфера научных интересов – экология, системы мониторинга окружающей среды.

Адрес: Национальный исследовательский университет "МИЭТ" (НИУ МИЭТ), пл. Шокина, д. 1, Зеленоград, Москва, 124498, Россия

E-mail: melaly@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5522-7427>

Волкова Елена Анатольевна – магистр техники и технологии по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2019), преподаватель НИУ МИЭТ. Автор более 15 научных работ. Сфера научных интересов – экология, системы мониторинга окружающей среды.

Адрес: Национальный исследовательский университет "МИЭТ" (НИУ МИЭТ), пл. Шокина, д. 1, Зеленоград, Москва, 124498, Россия

E-mail: eavolkova2015@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5647-2582>

Дорошенко Владислав Александрович – магистр техники и технологии по направлению "Телекоммуникации" (2020), инженер-программист АО "ПКК Миландр". Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – ПЛИС, цифровая обработка сигналов.

Адрес: АО "ПКК Миландр", Георгиевский пр., д. 5, Зеленоград, Москва, 124498, Россия

E-mail: doroshenko.v@milandr.ru

Солодков Алексей Викторович – магистр техники и технологии по направлению "Телекоммуникации" (2012), преподаватель НИУ МИЭТ. Автор более 30 научных публикаций. Сфера научных интересов – ПЛИС, цифровая обработка сигналов.

Адрес: Национальный исследовательский университет "МИЭТ" (НИУ МИЭТ), пл. Шокина, д. 1, Зеленоград, Москва, 124498, Россия

E-mail: solodkov_aw@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8663-372X>

References

1. Sevryukova E. A., Volkova E. A., Gubanova N. V., Solodkov A. V., Gorelik A. V. A Study on Design Principles of Automatic System for Environment Monitoring. 2020 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St Petersburg and Moscow, 27–30 Jan. 2020. Piscataway, IEEE, 2020, pp. 2545–2548. doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039522
2. Šećerov I., Dolinaj D., Pavić D., Milošević D., Savić S., Popov S., Živanov Ž. Environmental Monitoring Systems: Review and Future Development. *Wireless Engineering and Technology*. 2018, vol. 10, no. 1, pp. 1–18. doi: 10.4236/wet.2019.101001
3. Othman M. F., Shazali K. Wireless sensor network Applications: A study in environment monitoring System. *Procedia Engineering*. 2012, vol. 41, pp. 1204–1210. doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.302
4. Shiravale S., Sriram P., Bhagat S. M. Flood Alert System by using Weather Forecasting Data and Wireless Sensor Network. *Intern. J. of Computer Applications*. 2015, vol. 124, no. 10, pp. 14–16. doi: 10.5120/ijca2015905608
5. Wiston M., Mphale K. M. Weather Forecasting: From the Early Weather Wizards to Modern-day Weather Predictions. *J. of Climatology & Weather Forecasting*. 2018, vol. 6, no. 2, pp. 1–9. doi: 10.4172/2332-2594.1000229
6. Ayele T. W., Mehta R. Air Pollution Monitoring and prediction Using IoT. 2018 Second Intern. Conf. on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT). Coimbatore, India, 20–21 April 2018. Piscataway, IEEE, 2018, pp. 1741–1745. doi: 10.1109/ICICCT.2018.8473272
7. Xie X., Semanjski I., Gautama S., Tsiligiann E., Deligiannis N., Rajan R. T., Pasveer F., Philips W. A Review of Urban Air Pollution Monitoring and Exposure Assessment Methods. *ISPRS Intern. J. of Geo-Information*. 2017, vol. 6, no. 12, pp. 1–21. doi: 10.3390/ijgi6120389
8. Rehman A., Abbasi A. Z., Islam N., Shaikh Z. A. A Review of Wireless Sensors and Networks' applications in Agriculture. *Computer Standards & Interfaces*. 2014, vol. 36, no. 2, pp. 263–270. doi: 10.1016/j.csi.2011.03.004
9. Navulur S., A. S. C. S. Sastry, M. N. Giri Prasad Agricultural Management through wireless Sensors and Internet of Things. *Intern. J. of Electrical and Computer Engineering*. 2017, vol. 7, no. 6, pp. 3492–3499. doi: 10.11591/ijece.v7i6.pp3492-3499
10. Saiz-Rubio V., Rovira-Más F. From Smart Farming towards Agriculture 5.0: a Review on Crop Data Management. *Agronomy*. 2020, vol. 10, no. 2, pp. 1–21. doi: 10.3390/agronomy10020207
11. Mieleveville F., Galos M., Navarro D. Dynamic Reconfiguration for Software and Hardware Heterogeneous Real-time WSN. *SENSORCOMM 2012. The Sixth Intern. Conf. on Sensor Technologies and Applications*. Rome, Italy, IARIA, 19–24 Aug. 2012, pp. 95–100.
12. Sevryukova E. A., Volkova E. A., Ugrovatov A. V., Kopylova M. D. Imitation simulation of environment monitoring system. *Proc. Univ. Electronics*. 2019, vol. 24, no. 5, pp. 521–529. doi: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-521-529. (In Russ.)
13. Luo F., Jiang C., Zhang H., Wang X., Zhang L., Ren Y. Node Energy Consumption Analysis in Wireless Sensor Networks. *IEEE 80th Vehicular Technology Conf. (VTC2014-Fall)*. Vancouver, Canada, 14–17 Sept. 2014, pp. 1–5. doi: 10.1109/VTCFall.2014.6966071
14. Pasolini G., Buratti C., Feltrin L., Zabini F., De Castro C., Verdone R., Andrisano O. Smart City Pilot Projects Using LoRa and IEEE802.15.4 Technologies. *Sensors*. 2018, vol. 18, iss. 4, pp. 1118–1134. <https://doi.org/10.3390/s18041118>
15. Fattah H. 5G LTE Narrowband Internet of Things (NB-IoT). Boca Raton, CRC Press, 2019, 262 p. <https://doi.org/10.1201/9780429455056>
16. Paving the path to Narrowband 5G with LTE Internet of Things (IoT). White Paper, Qualcomm. 2016, 36 p. Available at: <https://www.qualcomm.cn/media/documents/files/paving-the-path-to-narrowband-5g-with-lte-iot.pdf> (accessed 25.02.2021)
17. Wang Y.-P. E., Lin X., Adhikary A., Grovlen A., Sui Y., Blankenship Y., Bergman J., Razaghi H. S. A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*. 2017, vol. 55, no. 3, pp. 117–123. doi: 10.1109/MCOM.2017.1600510CM
18. Dahlman E., Parkvall S., Skold J. 4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G. London, Academic Press, 2016, 616 p.
19. Liberg O., Sundberg M., Wang E., Bergman J., Sachs J. Cellular Internet of things: technologies, standards, and performance. London, Academic Press, 2017, 382 p. doi: 10.1016/C2016-0-01868-5
20. Tarasov I. E. PLIS Xilinx. *Yazyki opisaniya apparatury VHDL i Verilog, SAPR, priemy proektirovaniya*. [Hardware Description Languages VHDL and Verilog, CAD, Design Techniques]. Moscow, *Goryachaya liniya – Telekom*, 2020, 538 p. (In Russ.)
21. Elliot R. A., Enderwitz M. A., Louise C. H., Stewart R. W. The Zynq Book: Embedded Processing with the ARM Cortex-A9 on the Xilinx Zynq-7000 All Programmable SoC. Glasgow, Strathclyde Academic Media, 2014, 484 p.

Information about the authors

Elena A. Sevryukova, Dr. Sci. (Eng.) (2017), professor, deputy director of Institute of Advanced Materials and Technologies National Research University of Electronic Technology – MIET. The author of more than 60 scientific publications. Area of interest: ecology, monitoring.

Address: National Research University of Electronic Technology – MIET, Bld. 1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow 124498, Russia

E-mail: melaly@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5522-7427>

Elena A. Volkova, Master of Engineering (2019), teacher in MIET. The author of 15 scientific publications. Area of interest: ecology, monitoring.

Address: National Research University of Electronic Technology – MIET, Bld. 1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow 124498, Russia

E-mail: eavolkova2015@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5647-2582>

Vladislav A. Doroshenko, Master of Engineering (2020), software engineer of JSC " PAC Milander". The author of 2 scientific publications. Areas of interest: FPGA, digital signal processing.

Address: JSC " PAC Milander", 5 Georgievskiy Pr., Zelenograd, Moscow 124498, Russia

E-mail: doroshenko.v@milandr.ru

Alexey V. Solodkov, Master of Engineering (2012), teacher in MIET. The author of more than 30 scientific publications. Area of interest: FPGA, digital signal processing.

Address: National Research University of Electronic Technology – MIET, Bld. 1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow 124498, Russia

E-mail: solodkov_aw@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8663-372X>

Знаменательные даты

К 70-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ А. А. ПОТАПОВА



Профессор А. А. Потапов

4 мая 2021 г. исполнилось 70 лет известному ученому в области радиофизики и радиолокации, статистической радиотехники, распознавания и обработки изображений и сигналов, фрактального анализа, дробных операторов, фрактальных антенн, фрактальной электродинамики и детерминированного хаоса, доктору физико-математических наук, профессору Александру Алексеевичу Потапову.

Александр Алексеевич Потапов родился в с. Лукино Ржаксинского района Тамбовской области. После окончания средней школы с золотой медалью в 1968 г. он поступил в Рязанский радиотехнический институт на радиотехнический факультет. Затем в 1979 г. окончил вечернее отделение физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

С 1979 г. А. А. Потапов работает в Институте радиотехники и электроники (ИРЭ) РАН. За эти годы он прошел путь от младшего научного сотрудника до главного научного сотрудника.

В 1989 г. Александр Алексеевич защитил кандидатскую диссертацию, а в 1994 г. – докторскую диссертацию.

С 1981 г. главное научное направление работ А. А. Потапова – применение теории фракталов, текстур, дробных операторов, скейлинга и детерминированного хаоса в радиофизике, радиолокации, радиоэлектронике, теории антенн, электродинамике, теории управления и в широком спектре смежных научных и технических направлений для создания и развития прорывных информационных технологий.

Результаты научной деятельности А. А. Потапова по фрактальной обработке информации в интенсивных помехах, а также по фрактальным радиосистемам и фрактальным радиоэлементам опубликованы в четырех отчетных докладах Президиума Российской академии наук (Научные достижения РАН. М.: Наука, 2008, 2010, 2012 и 2013 гг.), а также в Докладе Правительству Российской Федерации: Об итогах реализации в 2011 г. Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2008–2012 гг. (в трех томах. М.: Наука, 2012). Все эти приоритетные в науке результаты позволяют перейти на новый уровень информационной структуры реальных немарковских сигналов и полей.

А. А. Потапов – ученый секретарь диссертационного совета при ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН (1999–2018). Дважды (1997–2000 и 2000–2003 гг.) ему присуждалась Государственная научная стипендия. Он заместитель председателя научно-квалификационного семинара (НКС) по направлению "Проблемы современной радиофизики" и член НКС по направлению "Информатика" в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. В период 2000–2002 гг. А. А. Потапов – профессор МИРЭА, с 2008 г. по 2019 г. – профессор Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. Член Нижегородского математического общества (2017). В 2015 г. А. А. Потапов избран действительным членом Вневедомственного экспертного совета по проблемам воздушно-космической сферы (ВЭС ВКС).

В 2015 г. А. А. Потаповым открыты, предложены, обоснованы и разработаны принципы нового вида и нового метода радиолокации, а именно фрактально-скейлинговой или масштабно-инвариантной радиолокации.

А. А. Потапов – автор монографии "Фракталы в радиофизике и радиолокации" (М.: Логос, 2002. 664 с., тираж 1000 экз.), которая в 2005 г. была переработана и дополнена (Потапов А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. М.: Университетская книга, 2005. 848 с., тираж 2000 экз.). А. А. Потапов – также автор и соавтор многих монографий по вопросам радиолокации и применения фракталов в науке и технике.

Чтение лекций по разработанным им в ИРЭ РАН фрактальным технологиям и доклады по проекту МНТЦ (совместно с ЦКБ "Алмаз") в 2000 и 2005 г. в США (Вашингтон, Нью-Йорк, Хантсвилл, Атланта, Франклин), в Китае (2011 г. и по настоящее время) и на многочисленных международных конференциях (Англия, США, Канада, Голландия, Австрия, Германия, Франция, Испания, Италия, Венгрия, Греция, Турция, Шотландия, Швейцария, Швеция, Мексика, Китай, Сербия, Черногория, Болгария, Казахстан, Белоруссия, Украина) принесли ему широкую известность в кругах международной научной общности.

А. А. Потапов опубликовал лично и в соавторстве свыше 1150 научных работ в отечественных и международных изданиях, включая более 45 монографий и глав в книгах на русском и английском языках, 2 патента и 9 учебных пособий. На международных и всероссийских конференциях сделал более 500 докладов, из них более 300 пленарных и секционных докладов как приглашенный докладчик. Им разработан курс лекций по применению фракталов и вейвлетов в радиолокации для Центра подготовки специалистов Концерна РТИ Системы (РТИ им. акад. А. Л. Минца и ОАО НПК НИИДАР).

По монографиям А. А. Потапова поставлены курсы лекций "Фракталы в статистической радиофизике", "Статистическая теория фрактальной радиолокации", "Фракталы в радиофизике и радиолокации", "Статистическая фрактальная радиотехника", "Фракталы в машиностроении" и др. в различных университетах России и стран ближнего зарубежья.

А. А. Потапов – главный редактор журнала "Нелинейный мир" (2003), член редколлегий и редакционных советов 13 российских и международных журналов. С 2015 г. является членом редакционной коллегии в журнале "Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника".

А. А. Потапов – почетный профессор Евразийского национального университета (Астана, Казахстан, 2010), почетный профессор Джинанского университета (Honorary Professor of Jinan University, г. Гуанчжоу, Китай, 2011). Он назначен президентом китайско-российской лаборатории информационных технологий и фрактальной обработки сигналов (2012). В апреле 2015 г. А. А. Потапов в Пекине победил в международном научном конкурсе и выиграл правительственный грант Китая "Leading Talents" по фрактальным методам обработки сигналов и изображений.

А. А. Потапов – академик Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова и академик РАЕН. Входит в состав оргкомитетов многочисленных международных и российских конференций. В 1997 г. награжден медалью "В память 850-летия Москвы". Награжден знаком "Почетный радист РФ" (2006) и восемнадцатью медалями. Лауреат премии им. акад. А. М. Прохорова (2013) и премии ВЭС ВКС (2016). Решением Президиума Центрального Совета РНТОРЭС им. А. С. Попова в 2015 г. А. А. Потапов награжден медалью "За заслуги в развитии радиоэлектроники и связи". В честь 40-летия научной деятельности в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН и за выдающиеся достижения в области инженерных наук награжден настольной медалью им. акад. А. М. Прохорова (2019).

Высокая научная эрудиция, работоспособность, принципиальность, целеустремленность, большое чувство ответственности за дело, которым он занимается, и всепоглощающая любовь к науке принесли А. А. Потапову заслуженный авторитет и широкую известность среди ученых.

Поздравляем профессора, д-ра физ.-мат. наук Александра Алексеевича Потапова с юбилеем, желаем ему крепкого здоровья, долгих лет жизни, счастья, удачи и новых научных свершений.

Редакция

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: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", редакция журнала "Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника"

Технические вопросы можно выяснить по адресу radioelectronic@yandex.ru

Известия высших учебных заведений России. **РАДИОЭЛЕКТРОНИКА**
Journal of the Russian Universities. **RADIOELECTRONICS**

Том 24 № 3 2021

Vol. 24 No. 3 2021

Научный редактор А. М. Мончак
Редакторы Э. К. Долгатов, И. Г. Скачек
Компьютерная верстка И. О. Буяновой

Science Editor A. M. Monchak
Editors E. K. Dolgatov, I. G. Skachek
DTP Professional I. O. Buyanova

Подписано в печать 18.06.21. Формат 60×84 1/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Уч.-изд. л. 15,08. Печ. л. 14,5. Тираж 300 экз. (1-й завод 1–150 экз.) Заказ 71.
Цена свободная.

Signed to print 18.06.21. Sheet size 60×84 1/8.
Educational-ed. liter. 15,08. Printed sheets 14,5. Number of copies 300.
Printing plant 1–150 copies. Order no. 71.
Free price.

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

ETU Publishing house
5 Prof. Popov St., St Petersburg 197376, Russia