DOI: 10.32603/1993-8985

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

Известия высших учебных заведений России

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Том 24 № 4 2021

Journal of the Russian Universities

RADIOELECTRONICS

Vol. 24 No. 4 2021

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 2021

Saint Petersburg
ETU Publishing house

Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника

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, Bielefild Academic Search Engine, Google Scolar, Library of Congress, Recearch4life, 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 LAHDERANTA, PhD, Prof., Технический университет, Лаппеенранта, Финляндия
Ferran MARTIN, PhD (Phys.), Prof., Автономный университет, Барселона, Испания
Piotr SAMCZYNSKI, PhD, Dr Sci., Associate Prof., Варшавский технологический университет, Институт электронных систем, Варшава, Польша
Thomas SEEGER, Dr Sci. (Eng.), Prof., Университет Зигена, Зиген, Германия
А. Г. ВОСТРЕЦОВ, д.т.н., проф., Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия
С. Т. КНЯЗЕВ, д.т.н., доц., Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия
А. Н. ЛЕУХИН, д.ф-м.н., проф., Марийский государственный технический университет, Йошкар-Ола, Россия
С. Б. МАКАРОВ, д.ф-м.н., проф., Санкт-Петербургский государственный политехнический университет им. Петра Великого, С.-Петербург, Россия
Л. А. МЕЛЬНИКОВ, д.ф.-м.н., проф., Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Саратов, Россия
А. А. МОНАКОВ, д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), С.-Петербург, Россия
А. А. ПОТАПОВ, д.ф.-м.н., гл.н.с., Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия
Н. М. РЫСКИН, д.ф.-м.н., гл.н.с., Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов, Россия
С. В. СЕЛИЩЕВ, д.ф.-м.н., проф., НИУ Московский институт электронной техники, Москва, Россия
А. Л. ТОЛСТИХИНА, д.ф.-м.н., гл.н.с., Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН, Москва, Россия
А. Б. УСТИНОВ, д.ф.-м.н., проф., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия
В. М. УСТИНОВ, д.ф-м.н., чл.-кор. РАН, директор, Центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, С.-Петербург, Россия
В. А. ЦАРЕВ, д.т.н., проф., Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Саратов, Россия
Ю. В. ЮХАНОВ, д.т.н., проф., Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

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

Цель журнала – освещение актуальных проблем, результатов прикладных и фундаментальных исследований, определяющих направление и развитие научных исследований в области радиоэлектроники
Журнал выполняет следующие задачи:
– предоставлять авторам возможность публиковать результаты своих исследований;
– расширять сферу профессионального диалога российских и зарубежных исследователей;
– способствовать становлению лидирующих мировых позиций ученых России в области теории и практики радиоэлектроники;
– знакомить читателей с передовым мировым опытом внедрения научных разработок;
– привлекать перспективных молодых специалистов к научной работе в сфере радиоэлектроники;
– информировать читателей о проведении симпозиумов, конференций и семинаров в области радиоэлектроники

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0

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

Registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (PI № FS77-74297 from 09.11.2018).
Subscription index in "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, Bielefi ld 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 adress:
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, Lappenranta, Finland
Anatolii N. LEUKHIN, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Mari State University, Yoshkar-Ola, Russia
Sergey B. MAKAROV, Dr Sci. (Eng.), Professor, Institute of Physics, Nanotechnology and Telecommunication St Petersburg Polytechnic University, St Petersburg, Russia
Ferran MARTIN, PhD (Phys.), Professor, Autonomous University, Barcelona, Spain
Leonid A. MELNIKOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia
Andrei A. MONAKOV, Dr Sci. (Eng.), Professor, State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia
Alexander A. POTAPOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of RAS, Moscow, Russia
Nikita M. RYSKIN, Dr Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Saratov Branch, Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Saratov, Russia
Piotr SAMCZYNSKI, PhD, Dr Sci., Associate Professor, Warsaw University of Technology, Institute of Electronic Systems, Warsaw, Poland
Thomas SEEGER, Dr Sci. (Eng.), Professor, University of Siegen, Siegen, Germany
Sergey V. SELISHCHEV, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia
Alla L. TOLSTIKHINA, Dr Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Divisional Manager, Institute of Crystallography named after A. Shubnikov RAS, Moscow, Russia
Vladislav A. TSAREV, Dr Sci. (Eng.), Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, Russia
Aleksey B. USTINOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia
Victor M. USTINOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Correspondent Member of RAS, director, Submicron Heterostructures for Microelectronics, Research & Engineering Center, RAS, St Petersburg, Russia
Aleksey G. VOSTRETSOV, 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 fi eld of radioelectronics.
Key Objectives:
–provide researchers in the fi eld 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 fi eld of radioelectronics at the international level;
– acquaint readers with international best practices in the implementation of scientifi c results;
– attract promising young specialists to scientifi c work in the fi eld of radioelectronics;
– inform readers about symposia, conferences and seminars in the fi eld 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

Тузова А. А., Павлов В. А., Белов А. А. Подавление мультипликативного шума на радиолокационных изображениях.....6

Viet Hung Tran, Minh Thien Hoang. Improving the Structure of a Signal Used for Real-Time Calibrating of the Receiving Channels of Digital Transceiver Modules in Digital Phased Antenna Arrays (*eng.*).....19

Телевидение и обработка изображений

Староверов Н. Е. Метод автоматизированного контроля электронных компонентов на микрофокусных рентгеновских снимках.....27

Электродинамика, микроволновая техника, антенны

Поленга С. В., Рязанцев Р. О., Полигина А. Д., Крылов Р. М., Литинская Е. А., Саломатов Ю. П. Разборная отражательная антенная решетка Ku-диапазона частот на основе микрополоскового элемента в виде мальтийского креста.....37

Радиолокация и радионавигация

Леонтьев В. В., Бородин М. А. Усечение падающего поля в задаче рассеяния электромагнитных волн на случайных поверхностях конечной длины.....48

Семенихин А. И., Семенихина Д. В., Юханов Ю. В., Благовисный П. В., Ильин И. В. Экспериментальные и численные исследования диаграмм обратного рассеяния блоков маскирующих цифровых двухбитных метапокрытий.....57

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

Жило Н. М., Михайлов М. О., Литинская Е. Л., Пожар К. В. Метод ИК-фотометрии для измерения концентрации глюкозы в растворе для перитонеального диализа…….....….68

Ханади Солиман, Нгуен Чонг Туен. Исследование погрешности оценки характеристик поздних потенциалов желудочков по 12-канальной электрокардиограмме……..79

От редакции

Правила для авторов статей 90

CONTENTS

Original articles

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

Tuzova A. A., Pavlov V. A., Belov A. A. Reduction of Multiplicative Noise in Radar Images.....6

Viet Hung Tran, Minh Thien Hoang. Improving the Structure of a Signal Used for Real-Time Calibrating of the Receiving Channels of Digital Transceiver Modules in Digital Phased Antenna Arrays.....19

Television and Image Processing

Staroverov N. E. A Method for Automated Control of Electronic Components on Microfocus X-ray Images……..…….....27

Electrodynamics, Microwave Engineering, Antennas

Polenga S. V., Ryazantsev R. O., Poligina A. D., Krylov R. M., Litinskaya E. A., Salomatov Yu. P. A Ku-Band Foldable Reflectarray Based on a Maltese-Cross Microstrip Element……..……..37

Radar and Navigation

Leont'ev V. V., Borodin M. A. Tapering the Incident Field When Solving Problems of Electromagnetic Wave Scattering Over Finite-Size Random Surfaces.....48

Semenikhin A. I., Semenikhina D. V., Yukhanov Yu. V., Blagovisnyy P. V., Ilyin I. V. Experimental and Numerical Investigations of Backscatter Patterns of the Blocks of Masking Digital Two-Bit Meta-covers.....57

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

Zhilo N. M., Mikhailov M. O., Litinskaia E. L., Pozhar K. V. IR-Photometry Method for Measuring Glucose Concentration in Peritoneal Dialysis Fluid.……...68

Hanadi Solieman, Nguyen Trong Tuyen. Investigation of Inaccuracies in the Assessment of Ventricular Late Potentials Using 12-lead ECG Recordings…….....79

From the Editor

Author's Guide.....90

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 6–18
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 6–18

Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов
УДК 004.932.4 Оригинальная статья
https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-4-6-18

Подавление мультипликативного шума на радиолокационных изображениях

А. А. Тузова[1], В. А. Павлов [2] ✉, А. А. Белов[2]

[1] Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

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

✉ pavit@bk.ru

Аннотация

Введение. Радиолокационное изображение (РЛИ) – это изображение, получаемое зондированием земной поверхности с помощью радиолокационного устройства. РЛИ обладает важной особенностью в виде спекл-шума, который вызывает зернистость фона. Данный шум необходимо фильтровать с целью улучшения качества РЛИ. Фильтры спекл-шума часто имеют в своей структуре один или несколько параметров, которые контролируют уровень сглаживания шума и значения которых приходится подбирать экспериментально. В статьях, посвященных фильтрации спекл-шума, авторы часто не поясняют, как были выбраны значения параметров фильтров.

Цель работы. Представление методики для выбора оптимальных в смысле качества получаемого изображения параметров фильтров мультипликативного спекл-шума на РЛИ.

Материалы и методы. Рассмотрена разработанная методика поиска оптимальных параметров фильтров спекл-шума применительно к наиболее часто используемым фильтрам. Поиск оптимальных параметров и тестирование работы фильтров проводятся на специально разработанном изображении, содержащем объекты, наиболее часто встречающиеся на РЛИ. Метрикой, оценивающей качество проведенной фильтрации, служил индекс структурного сходства SSIM (Structural Similarity Index Metric).

Результаты. После нахождения оптимальных по SSIM параметров рассматриваемых фильтров проведено сравнение работы фильтров с точки зрения обработки РЛИ и найдены наилучшие фильтры для этой задачи. Также работа рассматриваемых фильтров протестирована на изображениях, содержащих различные типы объектов, а именно: большие объекты, мелкие объекты, резкие границы. Зная, какой фильтр наилучшим образом справляется со сглаживанием шума на той или иной области и какие для этого необходимы значения варьируемых параметров, можно использовать полученные результаты для фильтрации радиолокационных изображений. Фильтрация не только улучшает восприятие РЛИ человеком, но и позволяет снизить влияние спекл-шума на дальнейшую автоматизированную обработку РЛИ (детектирование объектов, сегментация областей и др.).

Заключение. Предложенный алгоритм позволил найти оптимальные параметры для нескольких фильтров спекл-шума. Качество фильтрации оценивалось экспертным способом (визуально), посредством сравнения изображений до и после фильтрации, разностных изображений и одномерных срезов изображений. Фильтр Фроста и фильтр анизотропной диффузии с оптимальными параметрами показали лучшее качество обработки по SSIM.

Ключевые слова: радиолокационное синтезирование апертуры, радиолокационное изображение, спекл-шум, фильтрация спекл-шума, параметры фильтров

Для цитирования: Тузова А. А., Павлов В. А., Белов А. А. Подавление мультипликативного шума на радиолокационных изображениях // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 6–18. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-6-18

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 11.05.2021; принята к публикации после рецензирования 15.06.2021; опубликована онлайн 25.09.2021

© Тузова А. А., Павлов В. А., Белов А. А., 2021

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

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 6–18
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 6–18

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

Original article

Reduction of Multiplicative Noise in Radar Images

Anna A. Tuzova[1], Vitalii A. Pavlov[2]✉, Andrei A. Belov[2]

[1] Saint Petersburg State Marine Technical University, St Petersburg, Russia

[2] Peter the Great St Petersburg Polytechnic University, St Petersburg, Russia

✉ pavit@bk.ru

Abstract

Introduction. A radar image is an image obtained by remote sensing the earth's surface with a radar device. Radar images are characterized by background graininess caused by speckle noise, which should be filtered to improve the quality of radar images. The structure of speckle noise reduction filters often comprise one or more parameters to control the level of noise smoothing. The values of these parameters have to be selected experimentally. In works devoted to speckle noise filtering, the methods used for selecting filter paraments are rarely clarified.

Aim. To present a methodology for selecting the parameters of multiplicative speckle noise filters on a radar image that are optimal in terms of the quality of the resulting image.

Materials and methods. The article presents a method for determining the optimal parameters of speckle noise reduction filters. This method was applied to the most conventionally used filters. The search for optimal parameters and testing of the filters were carried out using a specially designed image, which contained the objects most frequently found on radar images. The structural similarity index (SSIM) metric was chosen as a metric that assesses the quality of filtration.

Results. After determining the optimal (in terms of SSIM) parameters of speckle noise reduction filters, the filters were compared to select the best filters in terms of the quality of radar image processing. In addition, the operation of the filters under study was tested on images containing various types of objects, namely: large objects, small objects and sharp borders. Knowing which filter copes best with smoothing speckle noise in a particular area and what values of the variable parameters this requires, an optimal quality of radar images can be achieved. Filtering not only improves human perception of radar images, but also reduces the influence of speckle noise during their further processing (object detection, segmentation of areas, etc.).

Conclusion. The proposed algorithm allowed optimal parameters for several speckle noise filters to be determined. The quality of filtration was assessed using an expert method (visually) by comparing images before and after filtration, differential images and one-dimensional image slices. The Frost filter and the anisotropic diffusion filter with optimal parameters showed the best processing quality according to the SSIM metric.

Keywords: synthetic aperture radar, radar image, speckle noise, speckle noise filtering, filter parameters

For citation: Tuzova A. A., Pavlov V. A., Belov A. A. Reduction of Multiplicative Noise in Radar Images. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 6–18. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-6-18

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 11.05.2021; accepted 15.06.2021; published online 25.09.2021

Введение. Радиолокационное изображение (РЛИ) – это изображение, получаемое зондированием земной поверхности с помощью радиолокационного устройства. Чаще всего для формирования РЛИ используется синтезирование апертуры [1, 2]. С помощью радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) можно получить изображения подстилающей поверхности вне зависимости от погодных условий и освещения, на большом расстоянии и в широкой полосе. Технологию СА можно использовать на беспилотных летательных аппаратах, на спутниках, в гидролокации и многих других областях. Метод позволяет решать множество задач – от картографирования местности до обнаружения интересующих объектов, что определяет актуальность исследований по данной тематике.

Однако РЛИ обладает важной особенностью, которую следует учитывать, а именно: на РЛИ наблюдается зернистость (неравномерность) фона.

Такой эффект вызван так называемым спекл-шумом [3, 4], который обусловлен когерентным сложением сигналов, принятых от множества элементарных отражателей, расположенных в пределах одного элемента разрешения поверхности. Данный шум нежелателен, поскольку его наличие при попытках извлечения полезной информации из РЛИ может приводить к ложному обнаружению целей или к их пропуску. Отсюда вытекает необходимость осуществления фильтрации спекл-шума с целью улучшения качества РЛИ и минимизации ошибок детектирования объектов на РЛИ [3, 4].

Фильтры спекл-шума часто имеют в своей структуре один или несколько параметров, контролирующих уровень сглаживания шума, значения которых приходится подбирать экспериментально. В статьях, посвященных фильтрации спекл-шума, авторы часто не поясняют, как были выбраны значения параметров фильтров [5–10]. Существуют статьи, в которых авторы проводят исследования по подбору значений варьируемых параметров фильтров спекл-шума [11–16]. Однако чаще всего в таких статьях происходит подбор только одного параметра (например, размера окна обработки), хотя фильтр может иметь и 3 варьируемых параметра, значения которых должны быть подобраны совместно. Либо же рассматривается выбор значений параметров только одного фильтра. Также имеется несколько работ, в которых авторы указывают на то, что они производили оптимизацию значений варьируемых параметров фильтров, однако алгоритм не раскрыт достаточно подробно и нет возможности повторить его для своих целей [17, 18]. Таким образом, в доступной литературе не был найден метод поиска значений параметров фильтров, удовлетворяющий следующим условиям: четкая формализация, универсальность для разных типов фильтров, учет всех варьируемых параметров фильтра и нахождение в открытом доступе с возможностью свободного использования.

Исходя из изложенного, цель данной работы – представить методику выбора оптимальных в смысле качества получаемого изображения параметров фильтров мультипликативного спекл-шума на РЛИ.

Спекл-шум и его фильтрация. Спекл-шум на РЛИ математически может быть смоделирован как модель мультипликативного шума, которая представляет собой умножение исходного изображения на случайный сигнал [3, 4]. Тогда зашумленное изображение $I'(x,y)$ описывается формулой

$$I'(x,y) = I(x,y)\big(1+n(x,y)\big), \qquad (1)$$

где $I(x,y)$ – исходное изображение (неискаженное); $n(x,y)$ – случайный процесс, описывающий спекл-шум.

К наиболее используемым фильтрам спекл-шума относятся локальные фильтры. Обработка изображений при использовании таких фильтров ведется в "скользящем окне", размеры которого намного меньше, чем размер всего изображения. К таким фильтрам относятся:

– медианный фильтр (варьируемый параметр – размер окна обработки) [19];

– фильтр Ли (варьируемый параметр – размер окна обработки) [20];

– фильтр Фроста (варьируемые параметры – размер окна обработки и коэффициент демпфирования (*D*), позволяющий регулировать гладкость фильтра) [21];

– фильтр Куана (варьируемые параметры – размер окна обработки и коэффициент *A*, позволяющий регулировать гладкость фильтра) [22];

– билатеральная фильтрация с гауссовским ядром (варьируемые параметры: размер окна обработки и параметры сглаживания σ_d^2 и σ_r^2) [23];

– метод оценки с помощью апостериорного максимума (MAP) (варьируемый параметр – размер окна обработки) [24].

Помимо локальных фильтров можно также выделить фильтр анизотропной диффузии Перона и Малика [25]. Особенность данного фильтра состоит в том, что при сглаживании шума он сохраняет границы на изображении и усиливает их интенсивность. Варьируемыми параметрами фильтра анизотропной диффузии являются шаг по времени Δt, параметр k и количество итераций t.

Качество работы фильтров оценивается с использованием математических методов (метрик), например:

– средний квадрат отклонения (Mean Squared Error – MSE) [19];

– пиковое отношение сигнал-шум (Peak Signal-to-Noise Ratio – PSNR) [19];

– индекс структурного сходства (Structural Similarity Index Metric – SSIM) [26];

– универсальный индекс качества изображений (Universal Quality Index – UQI) [27];

– разность модулей градиентов (Gradient Magnitude Similarity Deviation – GMSD) [28].

Авторы данной статьи провели сравнение перечисленных метрик для задач обработки РЛИ [29]. Исходя из полученных в [29] результатов далее будем использовать метрику SSIM для оценки качества изображений после применения к ним фильтров спекл-шума.

Распределение спекл-шума. Чтобы оценить качество фильтрации, необходимо иметь следующие изображения: эталонное изображение без шума, зашумленное изображение, изображение после фильтрации. Сравнение эталонного изображения с отфильтрованным позволяет оценить качество фильтрации. Поскольку эталонных РЛИ без влияния спекл-шума не имеется, то необходимо использовать синтетические РЛИ, накладывая по (1) шум на тестовые изображения. Чтобы иметь возможность наложить спекл-шум, необходимо знать, каким распределением вероятностей он описывается на реальных РЛИ и какие это распределение имеет параметры.

Чтобы получить такую информацию, было рассмотрено некоторое количество РЛИ и на каждом изображении были выделены фрагменты с равномерными областями, не содержащими каких-либо объектов. Равномерность области определялась по значению параметра, называемого эквивалентным количеством наблюдений (Equivalent Number of Looks – ENL). Данный параметр равен отношению квадрата среднего значения интенсивности пикселей в рассматриваемом фрагменте к дисперсии интенсивности пикселей в том же фрагменте. Чем выше ENL, тем равномернее считается область.

Далее, предположив, что спекл-шум имеет одинаковое распределение на всех выбранных РЛИ, интенсивности пикселей всех выбранных фрагментов были объединены в одну выборку. Была произведена аппроксимация плотности вероятности полученной выборки плотностью вероятности распределения Рэлея [30–33]. Из аппроксимирующего распределения Рэлея было получено, что параметр масштаба в данном случае равен 0.27. Гипотеза H_0 о том, что рассматриваемая выборка значений спекл-шума принадлежит распределению Рэлея с параметром масштаба 0.27, была проверена с помощью критерия согласия хи-квадрат (критерий согласия Пирсона) [34, 35]. В итоге получаем, что критерий хи-квадрат не опровергает гипотезу H_0 с уровнем статистической значимости 0.05.

Выбор оптимальных параметров фильтров спекл-шума. Была предложена методика, с помощью которой можно определить оптимальные параметры фильтров спекл-шума и затем использовать их для обработки РЛИ. Ранее авторами уже была рассмотрена данная методика в работе [36]. Однако здесь она будет раскрыта более подробно и применена к большему количеству фильтров спекл-шума.

Во-первых, как уже отмечалось, необходимо создать тестовое эталонное изображение, на которое будет накладываться шум, и затем оно будет использовано при поиске оптимальных параметров. Такое тестовое изображение должно содержать в себе наиболее часто встречающиеся на РЛИ объекты: машины, самолеты, дороги, дома, корабли, однородные участки (леса, водоемы, поля) и т. д. При этом, с другой стороны, используемые объекты должны иметь простую геометрическую форму, позволяющую легко оценивать результаты фильтрации визуально. Рассмотрим несколько изображений, содержащих указанные объекты, и найдем относительно простые геометрические формы, способные их аппроксимировать для использования в тестовом изображении.

Изображения, содержащие основные объекты, встречающиеся на РЛИ, и геометрические фигуры, способные аппроксимировать данные объекты, представлены на рис. 1. Видно, что аппроксимировать реальные объекты возможно, заменив машины на прямоугольники и квадраты; самолеты – на треугольники; деревья – на звезды, дороги – на широкую полосу; равномерные участки – на большие фигуры, например на прямоугольники. Таким образом, учитывая полученные результаты, можно создать тестовое изображение, подходящее для поиска оптимальных параметров фильтров спекл-шума (рис. 2). А на рис. 3 представлено это же изображение с наложенным на него с использованием (1) шумом.

При этом следует заметить, что результаты работы алгоритма в любом случае будут в той или иной мере зависеть от выбранного тестового изображения. В связи с этим приведенные далее результаты могут отличаться от полученных при другом

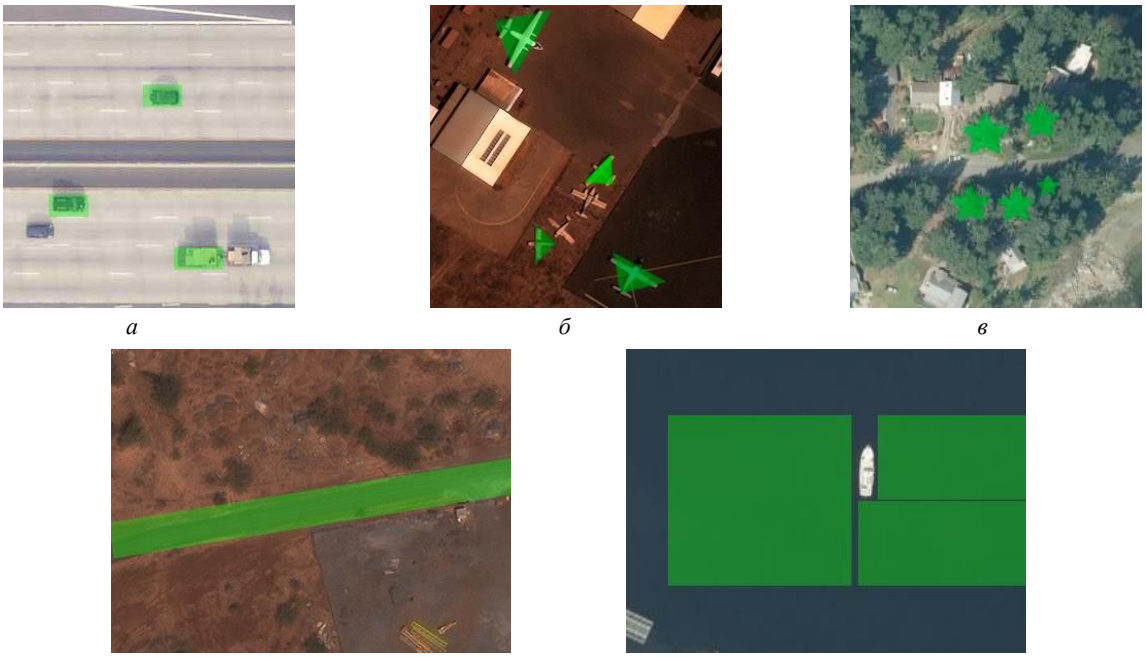


Рис. 1. Изображения, содержащие основные объекты, встречающиеся на РЛИ, и наложенные на них геометрические фигуры, способные аппроксимировать данные объекты: *а* – изображение, содержащее машины; *б* – изображение, содержащее самолеты; *в* – изображение, содержащее деревья; *г* – изображение, содержащее дорогу; *д* – изображение, содержащее равномерные участки (вода)

Fig. 1. Images containing objects typically found on radar images with superimposed geometric figures capable of approximating these objects: *а* – an image containing cars; *б* – an image containing planes; *в* – an image containing trees; *г* – an image containing a road; *д* – an image containing uniform areas (water)

выбранном тестовом изображении. Таким образом, желательно для каждой конкретной задачи создавать индивидуальное тестовое изображение, учитывающее возможные особенности, которые могут повлиять на результат.

Итак, имея эталонное тестовое изображение и изображение с наложенным шумом, можно приступить к поиску оптимальных параметров, который представляет собой итерационный оптимизационный процесс. Количество итераций зависит от количества варьируемых параметров у фильтра. Рассмотрим этапы оптимизации для указанных ранее фильтров:

1. Медианный фильтр, фильтр Ли и MAP-фильтр имеют только один варьируемый параметр (размер окна обработки m), поэтому оптимизационный процесс по поиску наилучшего значения данного параметра проводится за один этап и представляет собой построение зависимости значений метрики, оценивающей степень различий

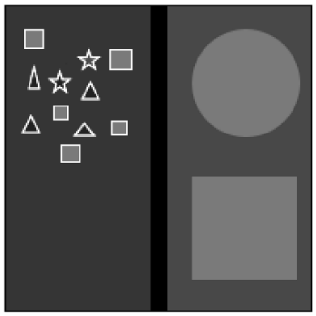


Рис. 2. Разработанное тестовое эталонное изображение

Fig. 2. The developed test reference image

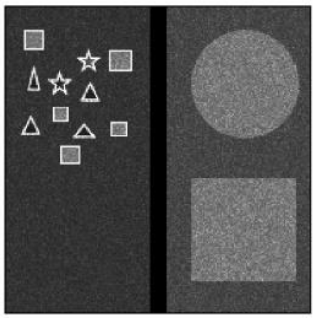


Рис. 3. Тестовое изображение с наложенным спекл-шумом

Fig. 3. The test image with superimposed speckle noise

между эталонным и отфильтрованным изображениями (в данной работе используется SSIM), от различных значений *m*. Из полученной зависимости определяется оптимальное значение параметра по максимуму SSIM.

2. Фильтр Фроста и фильтр Куана имеют по 2 варьируемых параметра (размер окна обработки и коэффициент, который позволяет регулировать гладкость фильтра). В данном случае оптимизационный процесс будет состоять из трех этапов:

– на первом этапе выбирается и фиксируется некое значение окна обработки и строится зависимость значений метрики от различных значений коэффициента, определяющего степень гладкости фильтра. Из полученной зависимости определяется начальное оптимальное значение коэффициента гладкости по максимуму SSIM;

– на втором этапе фиксируется начальное оптимальное значение коэффициента гладкости, найденное ранее, и строится зависимость значений метрики от различных значений размера окна обработки. Из данной зависимости определяется оптимальное значение размера окна обработки по максимуму SSIM;

– на третьем этапе повторяется процесс первого этапа с уточненным значением размера окна обработки, полученным на втором этапе.

Описанный процесс может повторяться до стабилизации результатов оптимизации

Билатеральный фильтр обладает тремя варьируемыми параметрами (размер окна обработки и 2 параметра сглаживания). Процесс оптимизации в данном случае аналогичен процессу оптимизации для фильтров Фроста и Куана, за исключением того, что вместо одного параметра сглаживания рассматриваются сразу два (строятся семейства зависимостей).

Фильтр анизотропной диффузии имеет 3 варьируемых параметра (шаг по времени Δt, параметр k и количество итераций t), среди которых нет размера окна обработки. В данном случае процесс оптимизации аналогичен процессу оптимизации для билатерального фильтра с отличием в том, что вместо окна обработки используется шаг по времени Δt.

Результаты. Были найдены оптимальные по метрике SSIM параметры рассматриваемых фильтров с использованием описанного алгоритма. Для фильтров, имеющих варьируемый размер окна обработки, начальный размер данного параметра был выбран 11×11. Полученные оптимальные параметры фильтров представлены в табл. 1. Тестовое изображение и разностные изображения после использования фильтров с оптимальными параметрами представлены на рис. 4. В отфильтрованное тестовое изображение включен небольшой фрагмент исходного зашумленного изображения для сравнения (обведен в синюю рамку).

Для визуализации работы фильтров можно использовать одномерные срезы изображений. Пример одномерных срезов для всех исследуемых фильтров представлен на рис. 5. Графики на рис. 5, *б* разнесены для удобства визуализации, чтобы они не накладывались друг на друга. Введенный между кривыми интервал равен 0.9.

Также рассмотрим значение SSIM на конкретных локальных областях, чтобы выделить, с какими типами объектов какой фильтр справляется лучше. Для этого рассмотрим отдельно области с мелкими объектами (примерно 10×10 пикселей), с большим объектом (примерно 150×150 пикселей) и область, содержащую границу (ширина примерно 10 пикселей). Локальные области до фильтрации представлены на рис. 6. Значения SSIM для локальных областей после фильтрации представлены в табл. 2.

Табл. 1. Найденные оптимальные параметры фильтров спекл-шума

Table 1. Optimal parameters of the speckle noise reduction filters under study

Фильтр	Параметр фильтра	Оптимальное значение параметра	SSIM при оптимальном значении параметров
Медианный	m	7 × 7	0.879
Ли	m	5 × 5	0.925
Фроста	m	13 × 13	0.948
	D	10.8	
Куана	m	13 × 13	0.893
	A	3.1	
Билатеральный	m	9 × 9	0.920
	σ_d^2	2	
	σ_r^2	0.2	
MAP	m	5 × 5	0.944
Анизотропная диффузия при экспоненциальной $g(x)$	Δt	0.24	0.976
	k	0.1	
	t	13	
Анизотропная диффузия при квадратичной $g(x)$	Δt	0.25	0.980
	k	0.05	
	t	13	

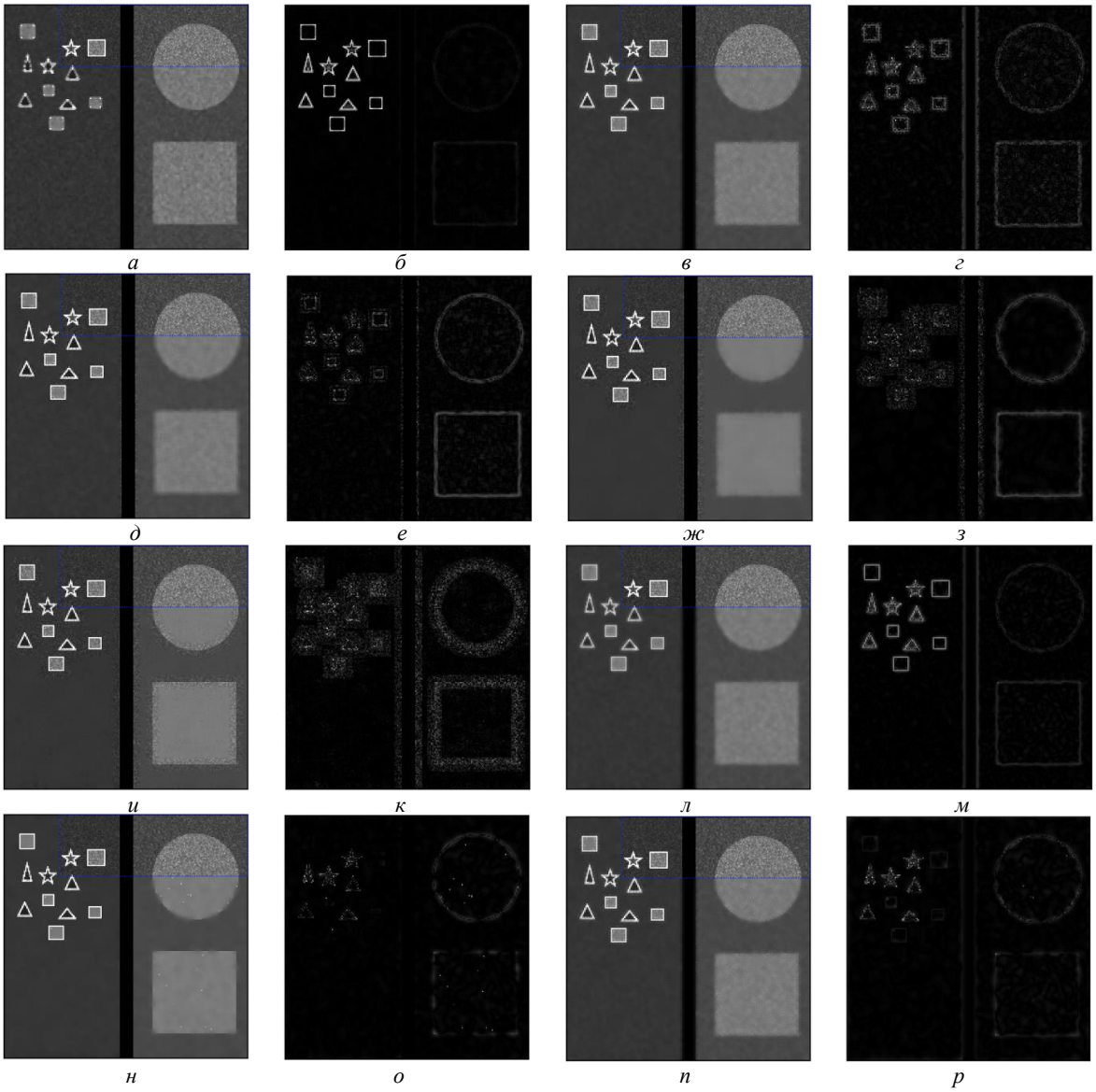
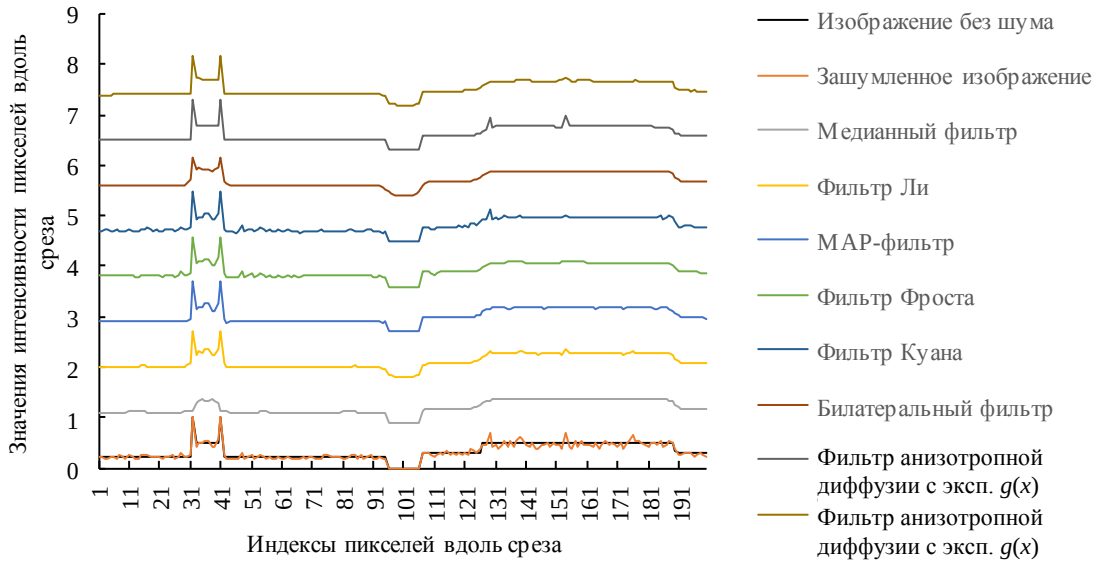


Рис. 4. Тестовое изображение и разностные изображения при использовании фильтров с оптимальными параметрами, найденными по SSIM: *а* – тестовое изображение после медианного фильтра, SSIM = 0.879; *б* – разностное изображение после медианного фильтра; *в* – тестовое изображение после фильтра Ли, SSIM = 0.925; *г* – разностное изображение после фильтра Ли; *д* – тестовое изображение после MAP-фильтра, SSIM = 0.944; *е* – разностное изображение после MAP-фильтра; *ж* – тестовое изображение после фильтра Фроста, SSIM = 0.948; *з* – разностное изображение после фильтра Фроста; *и* – тестовое изображение после фильтра Куана, SSIM = 0.893; *к* – разностное изображение после фильтра Куана; *л* – тестовое изображение после билатерального фильтра, SSIM = 0.920; *м* – разностное изображение после билатерального фильтра; *н* – тестовое изображение после фильтра анизотропной диффузии при экспоненциальной $g(x)$, SSIM = 0.976; *о* – разностное изображение после фильтра анизотропной диффузии при экспоненциальной $g(x)$; *п* – тестовое изображение после фильтра анизотропной диффузии при квадратичной $g(x)$, SSIM = 0.980; *р* – разностное изображение после фильтра анизотропной диффузии при квадратичной $g(x)$

Fig. 4. The test image and difference images obtained using filters with optimal parameters found by the SSIM metric: *a* – the test image after median filter, SSIM = 0.879; *б* – the difference image after median filter; *в* – the test image after Lee filter, SSIM = 0.925; *г* – the difference image after Lee filter; *д* – the test image after MAP-filter, SSIM = 0.944; *e* – the difference image after MAP-filter; *ж* – the test image after Frost filter, SSIM = 0.948; *з* – the difference image after Frost filter; *и* – the test image after Kuan filter, SSIM = 0.893; *к* – the difference image after Kuan filter; *л* – the test image after bilateral filter, SSIM = 0.920; *м* – the difference image after bilateral filter; *н* – the test image after anisotropic diffusion filter with exp. $g(x)$, SSIM = 0.976; *о* – the difference image after anisotropic diffusion filter with exp. $g(x)$; *п* – the test image after anisotropic diffusion filter with quad. $g(x)$, SSIM = 0.980; *р* – the difference image after anisotropic diffusion filter with quad. $g(x)$

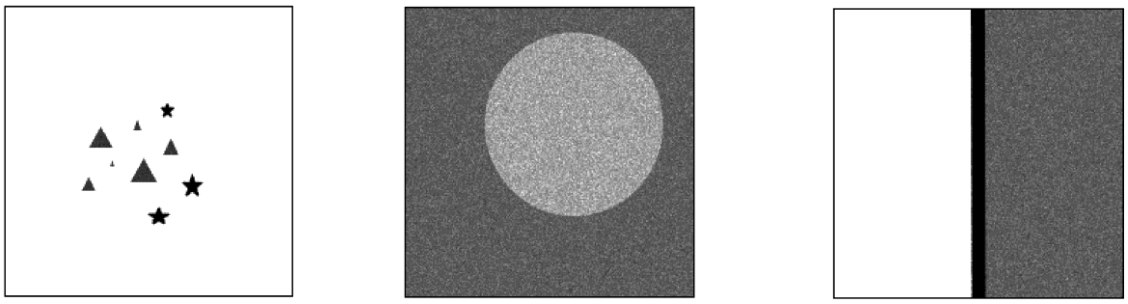
а



б

Рис. 5. Одномерные срезы при использовании всех фильтров с оптимальными параметрами, полученными с использованием SSIM: *а* – изображение без наложения шума с указанием линии среза; *б* – значения интенсивности пикселей вдоль среза для изображения до и после фильтрации различными методами

Fig. 5. One-dimensional slices using all filters with optimal parameters found by the SSIM metric: *а* – the image without speckle noise with the slice line position; *б* – the pixel intensity values along a slice before and after filtering by various methods



а *б* *в*

Рис. 6. Локальные области с наложенным на них спекл-шумом: *а* – мелкие объекты; *б* – большой объект; *в* – граница

Fig. 6. Local areas with superimposed speckle noise: *а* – small objects; *б* – a large object; *в* – a border

Анализ рис. 4, 5 и табл. 2 позволит сделать следующие выводы по каждому из фильтров:

– к положительным сторонам медианного фильтра можно отнести хорошее качество сглаживания шума на равномерных областях, а к негативным особенностям – сильное искажение мелких объектов. Поскольку РЛИ часто содержат большое количество малоразмерных объектов, медианный фильтр нецелесообразно использовать при обработке РЛИ;

– фильтр Ли, MAP- и билатеральный фильтры дают близкие результаты. Их можно использовать для обработки РЛИ, однако следует учитывать, что эти фильтры не так хорошо сглаживают зернистость на крупных объектах и однородных областях;

– фильтр Фроста хорошо сглаживает шум на однородных областях и крупных объектах, но оставляет небольшую зернистость по краям объектов. Может быть рекомендован для обработки РЛИ;

Табл. 2. Значения SSIM при фильтрации области с мелкими объектами (примерно 10×10 пикселей), с большим объектом (примерно 150×150 пикселей) и области, содержащей границу (ширина границы примерно 10 пикселей)

Table 2. SSIM values when filtering the area with small objects (approximately 10×10 pixels), with a large object (approximately 150×150 pixels) and the area containing a border (a width of approximately 10 pixels)

Фильтр	SSIM при фильтрации области с мелкими объектами	SSIM при фильтрации области с большим объектом	SSIM при фильтрации области, содержащей границу
Медианный	0.942	0.966	0.995
Ли	0.983	0.947	0.956
Фроста	0.993	0.980	0.989
Куана	0.970	0.895	0.968
Билатеральный	0.971	0.956	0.952
MAP	0.995	0.899	0.972
Анизотропная диффузия при экспоненциальной $g(x)$	0.998	0.957	0.984
Анизотропная диффузия при квадратичной $g(x)$	0.997	0.962	0.986

– фильтр Куана оставляет заметный неподавленный шум по краям объектов. Не рекомендуется для обработки РЛИ;

– фильтр анизотропной диффузии с квадратичной и экспоненциальной функцией $g(x)$ достаточно хорошо сглаживает шум, а также выделяет границы объектов. Может быть рекомендован для обработки радиолокационных изображений.

Заключение. В статье представлен автоматизированный метод для поиска оптимальных значений параметров фильтров спекл-шума на РЛИ. Метод основан на знании вида распределения спекл-шума и его параметров и использовании тестового изображения, которое специально создается с учетом особенностей выполняемой задачи. Оптимальность параметров фильтров определяется с помощью метрики оценки качества обработанного изображения SSIM. Поиск оптимальных параметров фильтров спекл-шума представляет собой итерационный оптимизационный процесс. Количество итераций зависит от количества варьируемых параметров фильтра.

С использованием предложенного алгоритма были найдены оптимальные параметры для нескольких фильтров спекл-шума. Качество фильтрации также оценивалось экспертным способом (визуально), посредством сравнения изображений до и после фильтрации, разностных изображений и одномерных срезов изображений. Фильтр Фроста и фильтр анизотропной диффузии с оптимальными параметрами показали лучшее качество обработки по SSIM. Программа для поиска оптимальных параметров реализована в среде MatLab и может быть доступна по ссылке на GitHub [37]. Основной код программы, позволяющий выбрать настройки и запустить все необходимые расчеты, содержится в файле FilteringSpeckleNoise_main_script.m.

Список литературы

1. Тузова А. А., Павлов В. А., Белов А. А. Применение платформы Jetson TX1 для реализации алгоритмов формирования радиолокационных изображений радиолокатора с синтезированной апертурой // Неделя науки СПбПУ 2019: материалы науч. конф. с международным участием. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2019. С. 26–29.

2. Pavlov V. A., Belov A. A., Tuzova A. A. Implementation of Synthetic Aperture Radar Processing Algorithms on the Jetson TX1 Platform // IEEE Intern. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), St Petersburg, 2019. P. 90–93. doi: 10.1109/EExPolytech.2019.8906850

3. Волков В. Ю. Адаптивное выделение мелких объектов на цифровых изображениях // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 1. С. 17–28.

4. Fursov V., Zherdev D., Kazanskiy N. Support subspaces method for synthetic aperture radar automatic target recognition // Intern. J. of Advanced Robotic Systems. 2016. Vol. 13, iss. 5. P. 1–11. doi: 10.1177/1729881416664848

5. Domg Y., Milne A. K., Forster B. C. Toward edge sharpening: a SAR speckle filtering algorithm // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Apr. 2001. Vol. 39, № 4. P. 851–863. doi: 10.1109/36.917910

6. Yongjian Yu., Acton S. T. Speckle reducing anisotropic diffusion // IEEE Transactions on Image Processing. 2002. Vol. 11, № 11. P. 1260–1270. doi: 10.1109/TIP.2002.804276

7. A New Image Quality Index for Objectively Evaluating Despeckling Filtering in SAR Images / L. Gomez, M. E. Buemi, J. C. Jacobo-Berlles, M. E. Mejail // IEEE J. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. Vol. 9, № 3. P. 1297–1307. doi: 10.1109/JSTARS.2015.2465167

8. Speckle Reduction of Reconstructions of Digital Holograms Using Gamma-Correction and Filtering / X. Huang, Z. Jia, J. Zhou, J. Yang, N. Kasabov // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 5227–5235. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2751540

9. Старовойтов В. В. Методика выбора фильтра для сглаживания спекл-шума радарных изображений с синтезированной апертурой // Информатика. 2015. № 2. P. 5–11.

10. Исследование методов удаления спекл-шумов на ультразвуковых изображениях / А. Бобкова, С. Поршнев, В. Зюзин, В. Бобков // The 23rd Intern. Conf. on Computer Graphics and Vision, Vladivostok, Sept. 2013. P. 244–246.

11. Touzi R. A review of speckle filtering in the context of estimation theory // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2002. Vol. 40, iss. 11. P. 2392–2404. doi: 10.1109/TGRS.2002.803727

12. Aja-Fernandez S., Alberola-Lopez C. On the estimation of the coefficient of variation for anisotropic diffusion speckle filtering // IEEE Transactions on Image Processing. 2006. Vol. 15, № 9. P. 2694–2701. doi: 10.1109/TIP.2006.877360

13. Oriented Speckle Reducing Anisotropic Diffusion / K. Krissian, C. Westin, R. Kikinis, K. G. Vosburgh // IEEE Transactions on Image Processing. 2007. Vol. 16, № 5. P. 1412–1424. doi: 10.1109/TIP.2007.891803

14. Improved Sigma Filter for Speckle Filtering of SAR Imagery / Jong-Sen Lee, Jen-Hung Wen, T. L. Ainsworth, Kun-Shan Chen, A. J. Chen // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2009. Vol. 47, № 1. P. 202–213. doi: 10.1109/TGRS.2008.2002881

15. FPGA-Based Adaptive Speckle Suppression Filter for Underwater Imaging Sonar / S. Karabchevsky, D. Kahana, O. Ben-Harush, H. Guterman // IEEE J. of Oceanic Engineering. 2011. Vol. 36, № 4. P. 646–657. doi: 10.1109/JOE.2011.2157729

16. Spatial filtering strategies on deforestation detection using SAR image textures / X. Dong, D. Zhang, K. Cui, C. Hu, X. Lv // CIE Intern. Conf. on Radar (RADAR), Guangzhou, China, 2016. P. 1–4. doi: 10.1109/RADAR.2016.8059472

17. Anisotropic Diffusion Filter With Memory Based on Speckle Statistics for Ultrasound Images / G. Ramos-Llordén, G. Vegas-Sánchez-Ferrero, M. Martin-Fernandez, C. Alberola-López, S. Aja-Fernández // IEEE Transactions on Image Processing. 2015. Vol. 24, № 1. P. 345–358. doi: 10.1109/TIP.2014.2371244

18. Paul A., Mukherjee D. P., Acton S. T. Speckle Removal Using Diffusion Potential for Optical Coherence Tomography Images // IEEE J Biomed Health Inform. 2019. Vol. 23, iss. 1. P. 264–272. doi: 10.1109/JBHI.2018.2791624

19. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. 2nd ed. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., USA, New Jersey 07458, 2001. 191 p.

20. Lee Jong-Sen Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1980. Vol. PAMI-2, № 2. P. 165–168. doi: 10.1109/TPAMI.1980.4766994

21. A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise / V. S. Frost, J. A. Stiles, K. S. Shanmugan, J. C. Holtzman // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1982. Vol. PAMI-4, № 2. P. 157–166. doi: 10.1109/TPAMI.1982.4767223

22. Adaptive restoration of images with speckle / D. Kuan, A. Sawchuk, T. Strand, P. Chavel // IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing. 1987. Vol. 35, № 3. P. 373–383. doi: 10.1109/TASSP.1987.1165131

23. Tomasi C., Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images // Sixth Intern. Conf. on Computer Vision (IEEE Cat. No.98CH36271), Bombay, India, 1998. P. 839–846. doi: 10.1109/ICCV.1998.710815

24. Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images / A. Lopes, E. Nezry, R. Touzi, H. Laur // Intern. J. of Remote Sensing. 1993. Vol. 14, iss. 9. P. 1735–1758. doi: 10.1080/01431169308953999

25. Perona P., Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1990. Vol. 12, iss. 7. P. 629–639. doi: 10.1109/34.56205

26. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity / Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli // IEEE Transactions on Image Processing. 2004. Vol. 13, iss. 4. P. 600–612. doi: 10.1109/TIP.2003.819861

27. Wang Z., Bovik A. C. A universal image quality index // IEEE Signal Processing Lett. 2002. Vol. 9, iss. 3. P. 81–84. doi: 10.1109/97.995823

28. Gradient magnitude similarity deviation: A highly efficient perceptual image quality index / W. Xue, L. Zhang, X. Mou, A. C. Bovik // IEEE Transactions on Image Processing. 2014. Vol. 23, iss. 2. P. 684–695. doi: 10.1109/TIP.2013.2293423

29. Comparison of Image Quality Assessment Metrics for Evaluation of Performance of Anisotropic Diffusion Filter for SAR Images / A. A. Tuzova, V. A. Pavlov, A. A. Belov, S. V. Volvenko // IEEE Intern. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), St Petersburg, 2020. P. 176–179. doi: 10.1109/EExPolytech50912.2020.9243957

30. Methods for Blind Estimation of Speckle Variance in SAR Images: Simulation Results and Verification for Real-Life Data / S. Abramov, V. Abramova, V. Lukin, N. Ponomarenko, B. Vozel, K. Chehdi, K. Egiazarian, Ja. Astol // Computational and Numerical Simulations. 2014. Ch. 24. P. 303–327. doi: 10.5772/57040

31. Choi H., Jeong J. Speckle noise reduction technique for SAR images using statistical characteristics of speckle noise and discrete wavelet transform // Remote Sensing, 2019. Vol. 11, iss. 1184. P. 1–27. doi: 10.3390/rs11101184

32. Xie Hua, Pierce L. E., Ulaby F. T. Statistical properties of logarithmically transformed speckle // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2002. Vol. 40, iss. 3. P. 721–727. doi: 10.1109/TGRS.2002.1000333

33. Singh P., Pandey R. Speckle noise: Modelling and implementation // Intern. J. of Circuit Theory and Applications. 2016. Vol. 9, iss. 17. P. 8717–8727.

34. Herman C., Lehmann E. L. The use of maximum likelihood estimates in χ^2 tests for goodness of fit // Ann. Math. Statist. 1954. Vol. 25, iss. 3. P. 579–586. doi: 10.1214/aoms/1177728726

35. Pearson K. On the criterion that a given system of deviations from theprobable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling // Breakthroughs in Statistics: Methodology and Distribution / eds. S. Kotz, N. L. Johnson. New York: Springer New York, 1992. P. 11–28. doi: 10.1007/978-1-4612-4380-9_2

36. Belov A. A., Pavlov V. A., Tuzova A. A. A Method of Finding Optimal Parameters of Speckle Noise Reduction Filters // Internet of Things, Smart Spaces and Next Generation Networks and Systems, Springer Intern. Publishing, 2020. P. 133–141. doi: 10.1007/978-3-030-65729-1_12

37. Тузова А. А. Проект по поиску оптимальных параметров фильтров спекл-шума. Файл FilteringSpeckleNoise_main_script.m. URL: https://github.com/AnnaTuzova/Speckle-noise-project (дата обращения 25.04.2021)

Информация об авторах

Тузова Анна Андреевна – магистр (2020, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)), инженер (2021, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет). Автор 6 научных публикаций. Сфера научных интересов – обработка сигналов, обработка изображений, обработка радиолокационных изображений.
Адрес: Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (СПбГМТУ), ул. Лоцманская, д. 3, Санкт-Петербург, 190121, Россия
E-mail: tuzova@corp.smtu.ru
https://orcid.org/0000-0001-8471-450X

Павлов Виталий Александрович – кандидат технических наук (2020, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)), ассистент (2020, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого). Автор 30 научных публикаций. Сфера научных интересов – обработка сигналов, обработка изображений, компьютерное зрение, машинное обучение, глубокое обучение, обработка радиолокационных изображений.
Адрес: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
E-mail: pavlov_va@spbstu.ru
https://orcid.org/0000-0003-0726-6613

Белов Андрей Александрович – специалист (1989, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)), ведущий инженер (2018, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)). Автор 15 научных публикаций. Сфера научных интересов – обработка сигналов, обработка изображений, обработка радиолокационных изображений.
Адрес: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
E-mail: belov@spbstu.ru
https://orcid.org/0000-0003-0617-4514

References

1. Tuzova A. A., Pavlov V. A., Belov A. A. *Primenenie plat-formy Jetson TX1 dlja realizacii algoritmov formirovanija radiolokacionnyh izobrazhenij radiolokatora s sintezirovannoj aperturoj*. *Nedelja nauki* SPBPU 2019: *materialy nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. SPb, Izd-vo Politehn. un-ta,* 2019, pp. 26–29. (In Russ.)

2. Pavlov V. A., Belov A. A., Tuzova A. A. Implementation of Synthetic Aperture Radar Processing Algorithms on the Jetson TX1 Platform. IEEE Intern. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). St Petersburg, 2019, pp. 90–93. doi: 10.1109/EExPolytech.2019.8906850

3. Volkov V. Ju. *Adaptivnoe vydelenie melkih ob'ektov na cifrovyh izobrazhenijah*. Radioelectronics. 2017, no. 1, pp. 17–28. (In Russ.)

4. Fursov V., Zherdev D., Kazanskiy N. Support subspaces method for synthetic aperture radar automatic

target recognition. Intern. J. of Advanced Robotic Systems. 2016, vol. 13, iss. 5, pp. 1–11. doi: 10.1177/1729881416664848

5. Domg Y., Milne A. K., Forster B. C. Toward edge sharpening: a SAR speckle filtering algorithm. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Apr. 2001, vol. 39, no. 4, pp. 851–863. doi: 10.1109/36.917910

6. Yongjian Yu., Acton S. T. Speckle reducing anisotropic diffusion. IEEE Transactions on Image Processing. Nov. 2002, vol. 11, no. 11, pp. 1260–1270. doi: 10.1109/TIP.2002.804276

7. Gomez L., Buemi M. E., Jacobo-Berlles J. C., Mejail M. E. A New Image Quality Index for Objectively Evaluating Despeckling Filtering in SAR Images. IEEE J. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016, vol. 9, no. 3, pp. 1297–1307. doi: 10.1109/JSTARS.2015.2465167

8. Huang X., Jia Z., Zhou J., Yang J., Kasabov N. Speckle Reduction of Reconstructions of Digital Holograms Using Gamma-Correction and Filtering. IEEE Access. 2018, vol. 6, pp. 5227–5235. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2751540

9. Starovoitov V. V. A method for selecting a filter for smoothing the speckle noise of radar images with a synthesized aperture. Computer science. 2015, no. 2, pp. 5–11. (In Russ.)

10. Bobkova A., Porshnev S., Zjuzin V., Bobkov V. *Issledovanie metodov udalenija spekl-shumov na ul'trazvukovyh izobrazhenijah*. The 23rd Intern. Conf. on Computer Graphics and Vision, Vladivostok, Sept. 2013, pp. 244–246. (In Russ.)

11. Touzi R. A review of speckle filtering in the context of estimation theory. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2002, vol. 40, iss. 11, pp. 2392–2404. doi: 10.1109/TGRS.2002.803727

12. Aja-Fernandez S., Alberola-Lopez C. On the estimation of the coefficient of variation for anisotropic diffusion speckle filtering. IEEE Transactions on Image Processing. Sept. 2006, vol. 15, no. 9, pp. 2694–2701. doi: 10.1109/TIP.2006.877360

13. Krissian K., Westin C., Kikinis R., Vosburgh K. G. Oriented Speckle Reducing Anisotropic Diffusion. IEEE Transactions on Image Processing. May 2007, vol. 16, no. 5, pp. 1412–1424. doi: 10.1109/TIP.2007.891803

14. Jong-Sen Lee, Jen-Hung Wen, Ainsworth T. L., Kun-Shan Chen, Chen A. J. Improved Sigma Filter for Speckle Filtering of SAR Imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2009, vol. 47, no. 1, pp. 202–213. doi: 10.1109/TGRS.2008.2002881

15. Karabchevsky S., Kahana D., Ben-Harush O., Guterman H. FPGA-Based Adaptive Speckle Suppression Filter for Underwater Imaging Sonar. IEEE J. of Oceanic Engineering. Oct. 2011, vol. 36, no. 4, pp. 646–657. doi: 10.1109/JOE.2011.2157729

16. Dong X., Zhang D., Cui K., Hu C., Lv X. Spatial filtering strategies on deforestation detection using SAR image textures. 2016 CIE Intern. Conf. on Radar (RADAR), Guangzhou, China, 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/RADAR.2016.8059472

17. Ramos-Llordén G., Vegas-Sánchez-Ferrero G., Martin-Fernandez M., Alberola-López C., Aja-Fernández S. Anisotropic Diffusion Filter With Memory Based on Speckle Statistics for Ultrasound Images. IEEE Transactions on Image Processing. Jan. 2015, vol. 24, no. 1, pp. 345–358, doi: 10.1109/TIP.2014.2371244

18. Paul A., Mukherjee D. P., Acton S. T. Speckle Removal Using Diffusion Potential for Optical Coherence Tomography Images. IEEE J Biomed Health Inform. Jan. 2019, vol. 23, iss. 1, pp. 264–272. doi: 10.1109/JBHI.2018.2791624

19. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. 2nd. ed. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., USA, New Jersey 07458. 2001, 191 p.

20. Lee Jong-Sen Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. March 1980, vol. PAMI-2, no. 2, pp. 165–168. doi: 10.1109/TPAMI.1980.4766994

21. Frost V. S., Stiles J. A., Shanmugan K. S., Holtzman J. C. A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. March 1982, vol. PAMI-4, no. 2, pp. 157–166. doi: 10.1109/TPAMI.1982.4767223

22. Kuan D., Sawchuk A., Strand T., Chavel P. Adaptive restoration of images with speckle. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing. March 1987, vol. 35, no. 3, pp. 373–383. doi: 10.1109/TASSP.1987.1165131

23. Tomasi C., Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images. Sixth Intern. Conf. on Computer Vision (IEEE Cat. No.98CH36271), Bombay, India, 1998, pp. 839–846. doi: 10.1109/ICCV.1998.710815

24. Lopes A., Nezry E., Touzi R., Laur H. Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images. Intern. J. of Remote Sensing. 1993, vol. 14, iss. 9, pp. 1735–1758, doi: 10.1080/01431169308953999

25. Perona P., Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1990, vol. 12, iss. 7, pp. 629–639. doi: 10.1109/34.56205

26. Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. IEEE Transactions on Image Processing. 2004, vol. 13, iss. 4, pp. 600–612. doi: 10.1109/TIP.2003.819861

27. Wang Z., Bovik A. C. A universal image quality index. IEEE Signal Processing Lett. 2002, vol. 9, iss. 3, pp. 81–84. doi: 10.1109/97.995823

28. Xue W., Zhang L., Mou X., Bovik A. C. Gradient magnitude similarity deviation: A highly efficient perceptual image quality index. IEEE Transactions on Image Processing. 2014, vol. 23, iss. 2, pp. 684–695. doi: 10.1109/TIP.2013.2293423

29. Tuzova A. A., Pavlov V. A., Belov A. A., Volvenko S. V. Comparison of Image Quality Assessment Metrics for Evaluation of Performance of Anisotropic Diffusion Filter for SAR Images. 2020 IEEE Intern. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), St Petersburg, 2020, pp. 176–179. doi: 10.1109/EExPolytech50912.2020.9243957

30. Abramov S., Abramova V., Lukin V., Ponomarenko N., Vozel B., Chehdi K., Egiazarian K., Astol Ja. Methods for Blind Estimation of Speckle Variance in SAR Images: Simulation Results and Verification for Real-Life Data. Computational and Numerical Simulations. 2014, ch. 24, pp. 303–327. doi: 10.5772/57040

31. Choi H., Jeong J. Speckle noise reduction technique for SAR images using statistical characteristics of speckle noise and discrete wavelet transform. Remote Sensing. May 2019, vol. 11, iss. 1184, pp. 1–27. doi: 10.3390/rs11101184

32. Xie Hua, Pierce L. E., Ulaby F. T. Statistical properties of logarithmically transformed speckle. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Mar. 2002, vol. 40, iss. 3, pp. 721–727. doi: 10.1109/TGRS.2002.1000333

33. Singh P., Pandey R. Speckle noise: Modelling and implementation. International Journal of Circuit Theory and Applications. 2016, vol. 9, iss. 17, pp. 8717–8727.

34. Herman C., Lehmann E. L. The use of maximum likelihood estimates in χ^2 tests for goodness of fit. Ann. Math. Statist. Sep. 1954, vol. 25, iss. 3, pp. 579–586. doi: 10.1214/aoms/1177728726

35. Pearson K. On the criterion that a given system of deviations from theprobable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling. Breakthroughs in Statistics: Methodology and Distribution. Eds. S. Kotz, N. L. Johnson. New York. Springer New York, 1992, pp. 11–28. doi: 10.1007/978-1-4612-4380-9_2

36. Belov A. A., Pavlov V. A., Tuzova A. A. A Method of Finding Optimal Parameters of Speckle Noise Reduction Filters. 2020 Internet of Things, Smart Spaces and Next Generation Networks and Systems, Springer Intern. Publishing, 2020, pp. 133–141. doi: 10.1007/978-3-030-65729-1_12

37. Tuzova A. A. The project to find the optimal parameters of speckle noise reduction filters. Filtering-SpeckleNoise_main_script.m file. Available at: https://github.com/AnnaTuzova/Speckle-noise-project (accessed 25.04.2021)

Information about the authors

Anna A. Tuzova, Master (2020, Peter the Great St Petersburg Polytechnic University (SPbPU)), engineer (2021, St Petersburg State Marine Technical University). Author of 6 scientific publications. Area of expertise: signal processing, image processing, radar image processing.
Address: St Petersburg State Marine Technical University (SMTU), 3 Lotsmanskaya St., St Petersburg 190121, Russia
E-mail: tuzova@corp.smtu.ru
https://orcid.org/0000-0001-8471-450X

Vitalii A. Pavlov, Ph.D. (2020, Peter the Great St Petersburg Polytechnic University (SPbPU)), assistant (2020, Peter the Great St Petersburg Polytechnic University). Author of 30 scientific publications. Area of expertise: signal processing, image processing, computer vision, machine learning, deep learning, radar image processing.
Address: Peter the Great St Petersburg Polytechnic University (SPbPU), 29 Polytechnicheskaya St., St Petersburg 195251, Russia
E-mail: pavlov_va@spbstu.ru
https://orcid.org/0000-0003-0726-6613

Andrei A. Belov, specialist (1989, Peter the Great St Petersburg Polytechnic University (SPbPU)), Leading Engineer (2018, Peter the Great St Petersburg Polytechnic University (SPbPU)). Author of 15 scientific publications. Area of expertise: signal processing, image processing, radar image processing.
Address: Peter the Great St Petersburg Polytechnic University (SPbPU), 29 Polytechnicheskaya St., St Petersburg 195251, Russia
E-mail: belov@spbstu.ru
https://orcid.org/0000-0003-0617-4514

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 19–26
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 19–26

Radio-Engineering Means of Transmission, Reception and Processing of Signals
UDC 621.391 Original article
https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-4-19-26

Improving the Structure of a Signal Used for Real-Time Calibrating of the Receiving Channels of Digital Transceiver Modules in Digital Phased Antenna Arrays

Viet Hung Tran✉, Minh Thien Hoang✉

Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

✉ hung.isi@lqdtu.edu.vn

✉ thienhm.isi@lqdtu.edu.vn

Abstract

Introduction. Modern digital phased array antenna (DPAA) systems incorporate a large number of identical transceiver modules (TMs). These modules require real-time calibration with a high level of accuracy. In a previous work, we proposed a real-time calibration method for all receiver channels, which is based on the use of a calibration signal (CalSig) of the same frequency spectrum as the reflected signal and modulated in phase and amplitude by BPSK and OOK codes, respectively. This method was found to have a number of advantages over conventional approaches. However, the use of the same CalSig sample for all receiving channels increases the noise power gain at the output of a digital beam-forming unit (DBU). To overcome this limitation, we set out to improve the structure of CalSigs by making them pseudo-orthogonal. As a result, the noise power gain at the DBU output can be significantly reduced compared to that obtained in our previous work.

Aim. To propose an improved design of a controlled amplitude modulation code OOK generator, which allows creation of pseudo-orthogonal CalSigs. As a result, the noise power gain at the output will increase insignificantly, thus having no negative effect on the quality of digital beam forming, signal processing and calibration.

Materials and methods. Theory of system engineering and technology; theory of digital signal processing; system analysis; mathematical modeling.

Results. An improved CalSig for calibrating the receiving channels of TMs was obtained. A structural diagram allowing the formation of pseudo-orthogonal CalSigs was synthesized.

Conclusions. We proposed a new approach to improving the structure of signals used for real-time calibrating the DPAA receiving channels. A structural diagram of an amplitude-modulated OOK code generator for pseudo-orthogonal CalSigs was developed.

Keywords: digital phased array antenna, real-time internal calibration, calibration signal, transceiver module, digital beamforming, integrated calibration subsystem

For citation: Viet Hung Tran, Minh Thien Hoang. Improving the Structure of a Signal Used for Real-Time Calibrating of the Receiving Channels of Digital Transceiver Modules in Digital Phased Antenna Arrays. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 19–26. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-19-26

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 17.06.2021; accepted 15.07.2021; published online 29.09.2021

Introduction. The method of real-time internal calibration of all receiver channels in digital phased antenna array (DPAA) systems is widely applied [1–6] for ensuring accuracy when forming a digital beam. Modern DPAA systems, as a rule, incorporate a large number of identical transceiver modules (TMs). Under the influence of such environmental factors as temperature or humidity and provided a high integration density of such TMs, the amplitude and phase parameters of a signal at the output of TM receiver channels may alter [7, 8]. Thus, to ensure the required quality of digital beamforming and reflected signal processing, the receiving channels of TMs should undergo real-time calibration during operation.

© Viet Hung Tran, Minh Thien Hoang, 2021

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

Fig. 1 presents a typical structural diagram of a DPAA system, in which the signal synthesizer performs the function of both generating a transmitting signal when transmitting and generating a calibration signal (CalSig) when receiving [4–6]. In order to make the system less cumbersome, high-frequency power dividers and high-frequency transmission lines are frequently used for transmitting signals to TMs. Therefore, the CalSigs fed to the input of the receiving channels can be considered essentially the same. Fig. 2 shows a structural diagram of a TM that integrates some components of a calibration subsystem for direct transmission of a signal to the receiving channel input. In comparison with conventional TM models, this scheme contains additional elements (marked yellow) in the receiving channel for calibration. This allows calibration to be performed in parallel with the receiving process.

In [9], we proposed a feasible method for internal calibration of receiving channels. Here, the CalSig structure is a signal that has the same frequency spectrum as the reflected signal, modulated in phase and amplitude according to BPSK and OOK codes and having a peak power equivalent to the internal noise

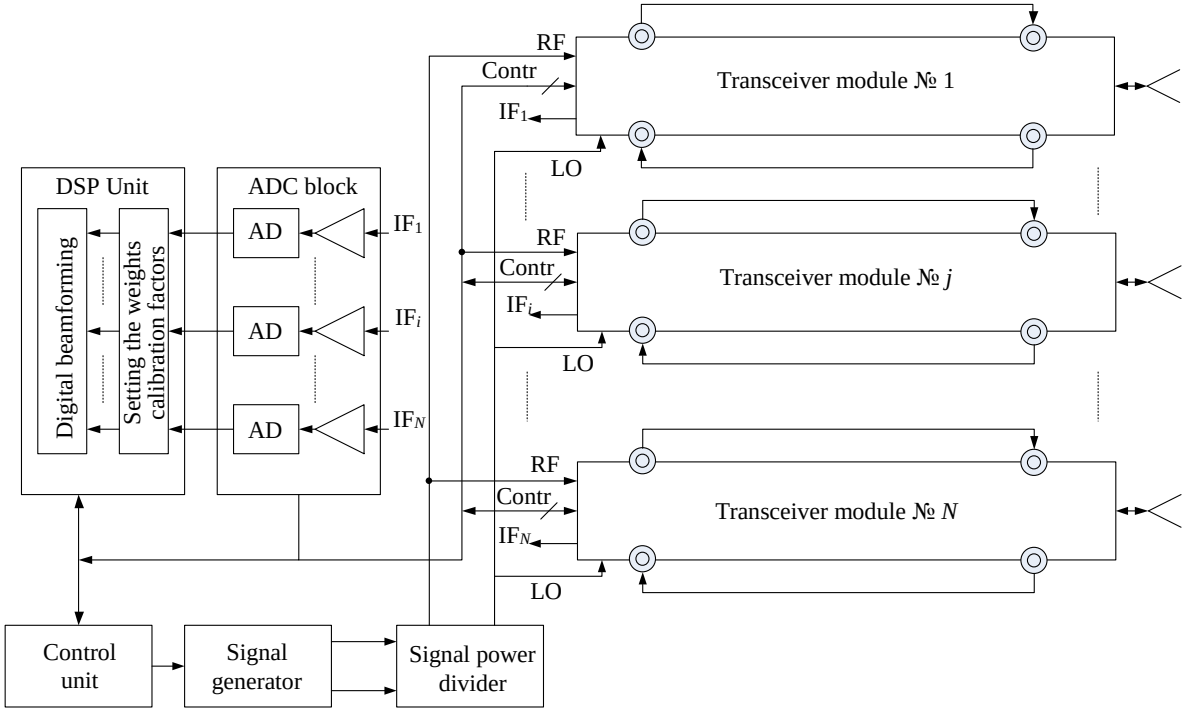


Fig. 1. Typical structure schema of DPAA system

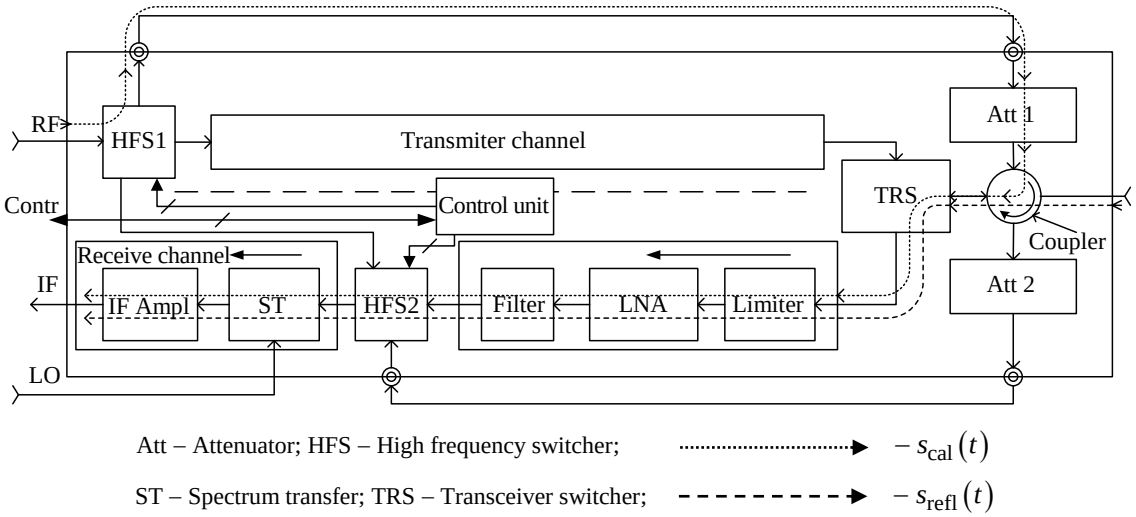


Fig. 2. Structure schema of a transceiver module

power level of the receiving channel. Within the framework of this approach, the CalSig fed from outside to the input of the receiving channel can be treated as external noise during estimation calculations. Then, the external noise will combine with the internal noise to form a composite noise (referred to as noise). For example, a DPAA system has N TMs calibrated by the same CalSig. Fig. 3, *a* depicts the internal noise and the CalSig in the receiving channel. Let P_{DBU} be the gain of noise power at the DBU output, the CalSig have a peak amplitude level taken as the normalized internal noise level of "1", and the amplitude modulation by OOK code with the duty cycle D. Then, at the DBU output, the internal noise has a power of N [10]. The CalSig has a peak amplitude of N, a peak power of N^2 and an average power of $N^2 \times D$ (Fig. 3, *b*). As a result, P_{DBU} will be equal to:

$$P_{\text{DBU}} \approx \frac{N + N^2 \times D}{N} = 1 + N \times D; \qquad (1)$$

$$P_{\text{DBU}}\left[\text{dB}\right] = 10 \lg\left(1 + N \times D\right). \qquad (2)$$

Note that, since the internal noise level was normalized to "1", P_{DBU} will be considered as the noise power gain at the DBU output. From (1) and (2), P_{DBU} is proportional to the product of N and D in the positive direction. Therefore, since the number of TMs, N, is fixed, P_{DBU} can be reduced by reducing D. However, according to our previous conclusions [9], this contradicts the requirements for measurement time of errors and quality of calibration. The calculation and simulation results in MatLab showed that, if $D = 1/45$ and $N = 128$, the noise power gain $P_{\text{DBU}}[\text{dB}] \approx 5.8$ dB, which is too large for digital beamforming and signal processing. Thus, the approach to internal calibration of receiving channels presented in [9], although having advantages over conventional approaches, cannot be considered exhaustive.

In this paper, we aim to continue our research into improving the CalSig structure. The logic is as follows: establishing a set of pseudo-orthogonal CalSigs from the basic CalSig, leading to a very low correlation coefficient between them. This proposal is an improvement of the calibration method described in [9]. The research results are simulated in the MatLab environment.

Improving the CalSig structure. A structural scheme describing the formation of CalSigs. As shown in [9], we derived the phase and amplitude modulation from the basic CalSig $s_{\text{cal}}(n)$ by two code forms – BPSK and OOK. On their basis, $s_{\text{cal}\,i}(n)$ and $s_{\text{cal}\,j}(n)$ $\left(i \neq j; i, j \in N\right)$ can be obtained such that:

$$K\left[s_{\text{cal}\,i}(n), s_{\text{cal}\,j}(n)\right] \to \min,$$

where $K\left[s_{\text{cal}\,i}(n), s_{\text{cal}\,j}(n)\right]$ is the correlation coefficient of $s_{\text{cal}\,i}(n), s_{\text{cal}\,j}(n)$. The ideal case is when $s_{\text{cal}\,i}(n)$ and $s_{\text{cal}\,j}(n)$ are orthogonal [11, 12]. When the BPSK code is applied for phase modulation,

$$C_i(n) \neq C_j(n). \qquad (3)$$

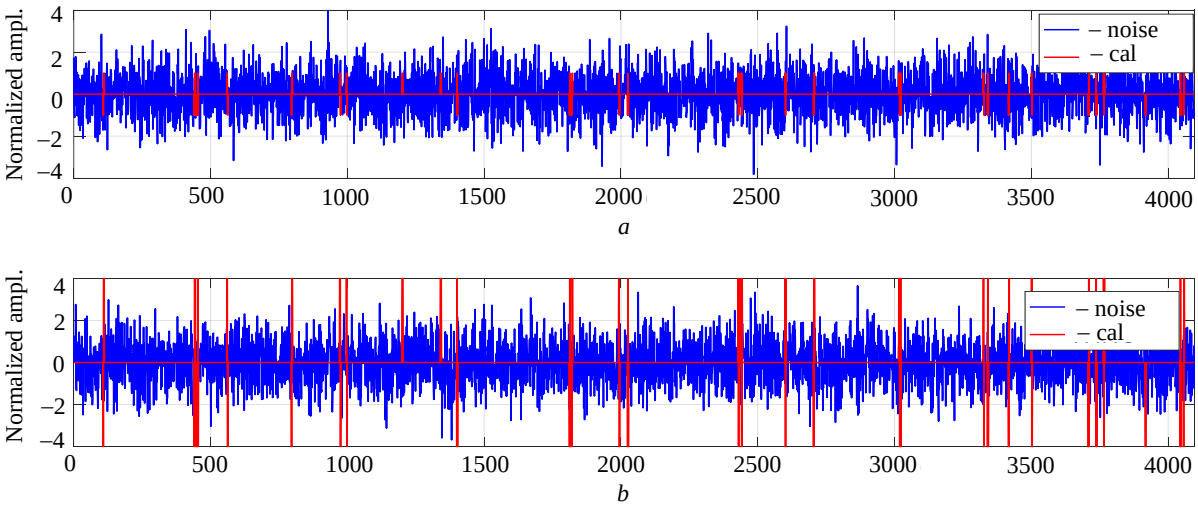


Fig. 3. Portrait of calibration signals and internal noise: *a* – in a receiver channel; *b* – in the DBU

Then the structural scheme will have the form as shown in Fig. 4, *a*. Accordingly, to implement (3), phase shifter elements with control lines can be used. However, when the number of receiving channels N is large, phase shift elements or flipping elements involved in hardware circuits will significantly complicate the entire system. Moreover, these elements may also become a source of phase and amplitude deviations [13].

The second option is to use OOK amplitude modulation codes [14] to form a CalSig for each receiving channel. Accordingly, the same OOK code will be used for generating $s_{\text{cal}\,i}(n)$ and $s_{\text{cal}\,j}(n)$, while the moment of the code activation control for each channel will be different. Then,

$$K_{\text{cor}}\left[\text{OOK}_i(n), \text{OOK}_j(n)\right]\Big\|_D \to 0,$$

where $K_{\text{cor}}\left[\text{OOK}_i(n), \text{OOK}_j(n)\right]\Big\|_D$ is the correlation coefficient between $\text{OOK}_i(n)$ and $\text{OOK}_j(n)$, provided that the duty cycle D is the same for all receiving channels.

A structural scheme of this alternative is shown in Fig. 4, *b*. Accordingly, the input signal will be the base signal $s_{\text{cal}}(n)$ that has been phase-modulated according to the BPSK code in the signal synthesizer. The results at the outputs will be

$$s_{\text{cal}\,i}(n) \neq s_{\text{cal}\,j}(n),$$

provided that $(i \neq j) \in N$.

An analysis of the two schemes in Fig. 4 shows that the second option is much simpler from the standpoint of engineering and technological design [15].

Fig. 5, *a* and *b* show the results of simulating the CalSig and the internal noise by two aforementioned options, provided that the duty cycle $D = 1/32$ is the same. Fig. 5, *c* shows the simulation results of the CalSig and the internal noise at the DBU output when $N = 64$. A comparison of Fig. 3, *c* and 5, *c* shows that, when $s_{\text{cal}\,i}(n) = s_{\text{cal}\,j}(n)$, $K_{\text{cor}} \to 1$ (Fig. 3, *c*), the noise power gain P_{DBU} at the DBU output will be greater than that at $s_{\text{cal}\,i}(n) \neq s_{\text{cal}\,i}(n)$ (Fig. 5, *c*).

However, when the number of TMs is too large, the "ON" levels (equivalent to "1") in OOK amplitude modulation codes may overlap. As a result, the correlation coefficient K_{cor} may not decrease to the desired value, and the noise power gain P_{DBU} will continue to affect the quality and accuracy of digital beamforming and signal processing. For greater clarity, the following section will estimate the P_{DBU} level and its impact on the detection quality of DPAA systems.

Internal noise gain at the DBU output and the CalSig impact on the performance quality of a radar system. Estimation of the internal noise power gain at the DBU output.

1. The procedure for estimating the power level of the noise gain at the DBU $P_{\text{DBU uncor}}$ is as follows:

– at the DBU output, the internal noise for a DPAA system consisting of N TMs is taken as N, since the internal noise of a channel is normalized to "1" [10];

– the amplitude modulation OOK codes $\text{OOK}_i(n)$ and $\text{OOK}_j(n)$ are considered different for each receiving channel at $\forall i;\ j \in N$. Hence, at the DBU output, all CalSigs can be considered as

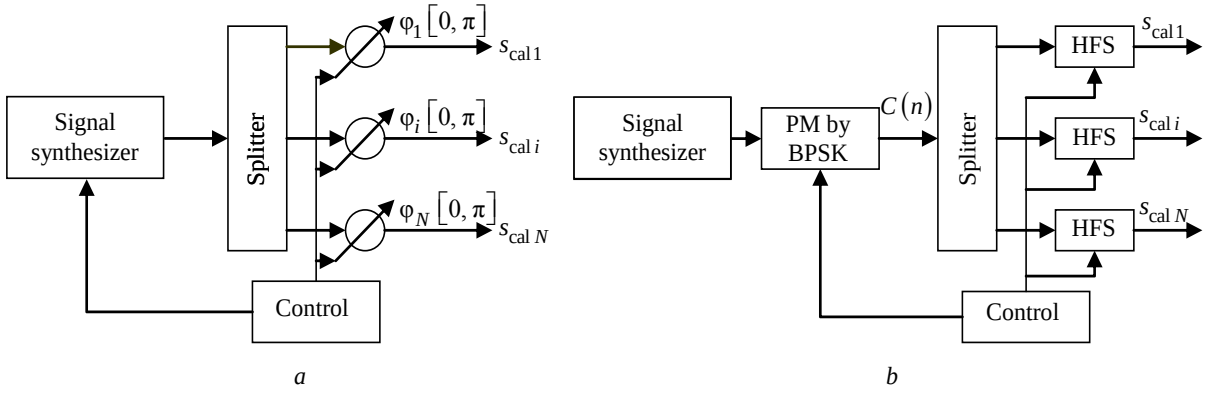


Fig. 4. Two schemes for the formation of pseudo-orthogonal calibration signals: *a* – using phase shifters; *b* – using switchs

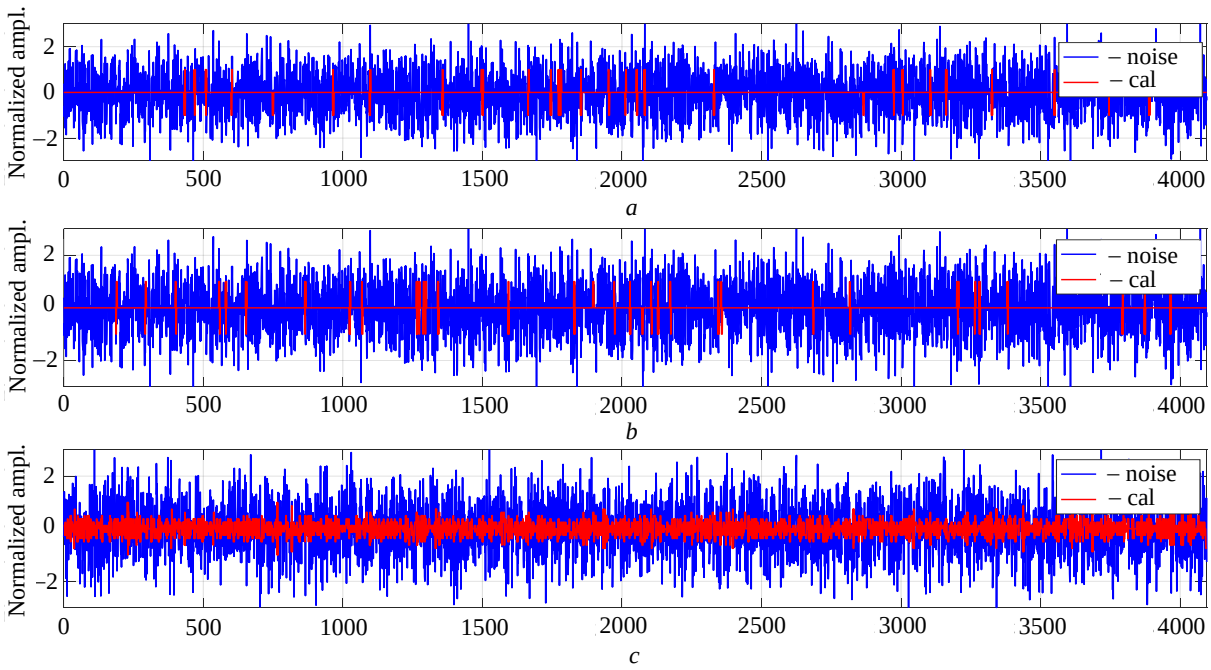


Fig. 5. Portrait of calibration signals and internal noise: *a*, *b* – when using OOK amplitude modulation code to form the calibration signals; *c* – at the DBU

those evenly distributed over the time domain (Fig. 5, *c*).

The amplitude level of the CalSigs can be taken close to ND, with the average power level being equal to $(ND)^2$. The power level of the noise gain at the DBU output $P_{\text{DBU uncor}}$ can be estimated as follows:

$$P_{\text{DBU uncor}} \approx \frac{N+(ND)^2}{N} = 1+N\times D^2, \quad (4)$$

$$P_{\text{DBU uncor}}\,[\text{dB}] = 10\lg\left(1+N\times D^2\right) = f(D). \quad (5)$$

A comparison of expressions (5) and (1) shows that

$$P_{\text{DBU uncor}} \ll P_{\text{DBU}},$$

since the duty cycle D is always lower than 1.

Fig. 6 shows the power level of the noise power gain at the DBU output P_{DBU} and $P_{\text{DBU uncor}}$ versus D estimates with different numbers of TMs for the two cases: $s_{\text{cal}\,i}(n) = s_{\text{cal}\,j}(n)$ and

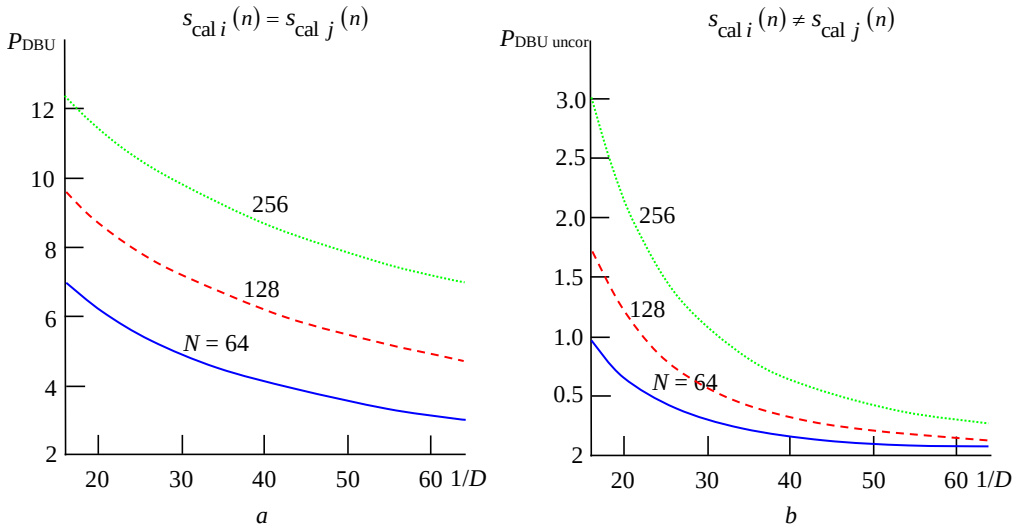


Fig. 6. Two graphs of the power level of the noise: *a* – when $s_{\text{cal}\,i}(n) = s_{\text{cal}\,j}(n)$; *b* – when $s_{\text{cal}\,i}(n) \neq s_{\text{cal}\,j}(n)$

$s_{\text{cal}\,i}(n) \neq s_{\text{cal}\,j}(n)$. For example, when the duty cycle D = 1/45 and the number of TMs $N = 128$, $P_{\text{DBU}}[\text{dB}] \approx 5.8\,\text{dB}$ and $P_{\text{DBU uncor}}[\text{dB}] \approx 0.27\,\text{dB}$.

2. The simulation results also prove the validity of the presented approach. Fig. 7 shows an algorithm for simulating the determination of $P_{\text{DBU uncor}}$ according to (4) with different values of D and N in the MatLab environment. Following this scheme, a continuous oscillating signal phase-modulated by the BPSK code is generated to form a basic CalSig $s_{\text{cal}}(n)$. For each receiving channel, the CalSig will be formed by multiplying $s_{\text{cal}}(n)$ by the OOK amplitude modulation code having a defined D. A normal-distributed internal noise is formed and added to each channel. Then, all the receiving channels are summarized and the power level of the noise gain at the DBU output is estimated. The simulation results are shown in Fig. 8.

Estimation of the CalSig impact on the performance quality of a radar system. Using the approach described in [9], the effect of CalSigs on the performance of a radar system should be estimated by considering the effect of the noise power gain at the DBU output on such an important parameter as the maximum detection distance for cases without and with a CalSig in each receiving channel. Accordingly, the relationship between the maximum detection distance and $P_{\text{DBU uncor}}$ is expressed as follows [9]:

$$R_{\text{max Cal}} / R_{\text{max}} = \sqrt[4]{1} / P_{\text{DBU unicor}}. \qquad (6)$$

Here, R_{max} and $R_{\text{max Cal}}$ are maximum detection distances for cases without and with a CalSig, respectively.

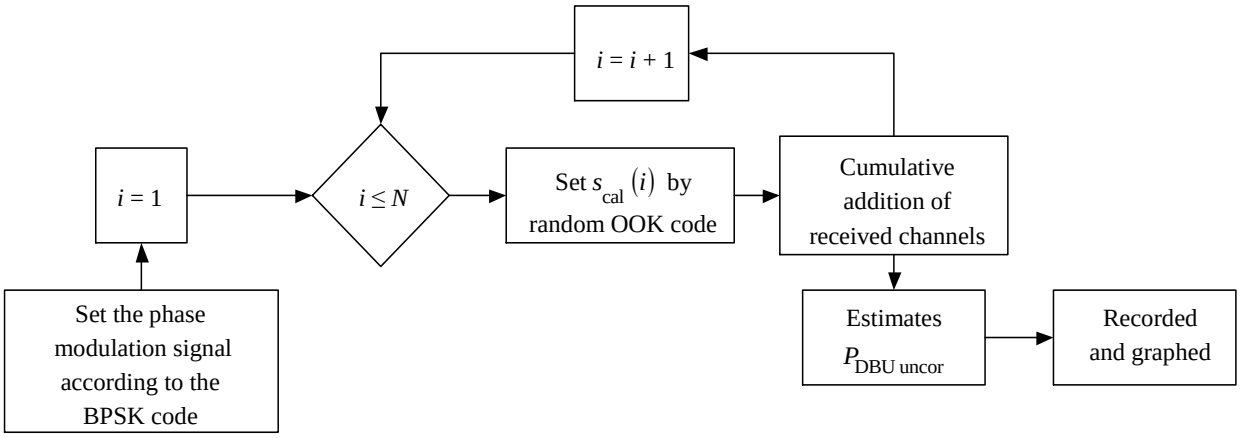


Fig. 7. Graph of the algorithm for simulating the determination of $P_{\text{DBU uncor}}$

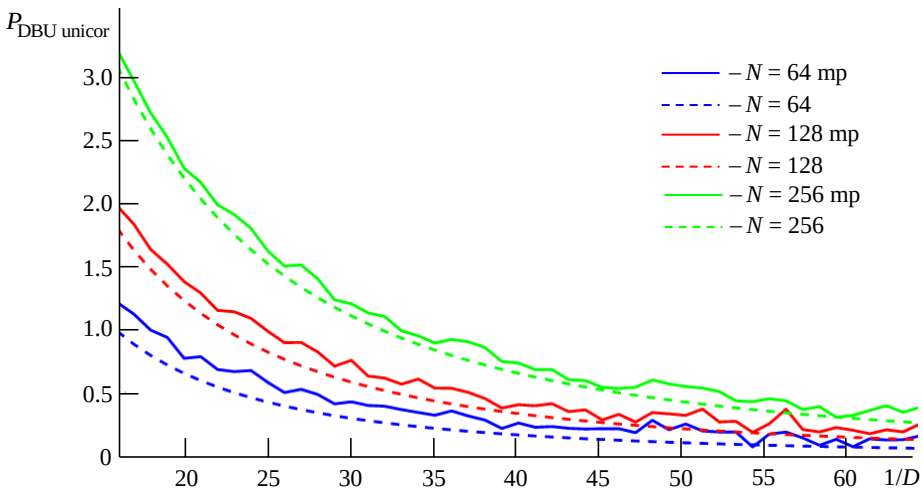


Fig. 8. Graph of simulation results of the noise power gain which is estimated at DBU

It can be seen from (6) and Fig. 8 that CalSigs do affect the detection distance of a radar system. However, this effect will be lower when the CalSigs are not correlated or poorly-correlated due to $P_{\text{DBU uncor}} \ll P_{\text{DBU}}$. For example, to ensure 98 % of the required operating distance with a permissible level of noise power gain at the DBU output $P_{\text{DBU uncor}}[\text{dB}] \sim 0.35\,\text{dB}$ and a certain number of TMs $N = 128$ or $N = 256$, the duty cycle value equals $D = 1/45$ or $1/60$, respectively. According to our approach described in [9], it is possible to verify whether the integrated calibration subsystem for internal calibration of receiving channels meets the real-time requirements of quality and accuracy.

Conclusion. This paper extends our previous research aimed at improving the structure of a signal used for internal calibration of the receiving TM channels in a DPAA system. It is proposed to form a pseudo-orthogonal CalSig for each receiving channel, which allows a significant reduction in the power level of the noise gain at the DBU output at the same time as ensuring the required quality of digital beamforming and signal processing. In addition, a structural diagram of a DPAA system with an integrated subsystem for automatically measuring and real-time calibrating the receiving channels of TMs was synthesized. The research results were simulated in the MatLab environment. The actual testing is being carried out at the Laboratory of the Institute of System Integration under LQD.TU SRVietnam.

References

1. Younis M., Rommelet T., de Almeida F. Q., Huber S., Martone M., Krieger G., Villano M. Investigations on the internal calibration of multi-channel SAR. 2017 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS), 2017, pp. 5386–5389. doi: 10.1109/IGARSS.2017.8128221

2. Kim D.-Ch., Park S.-Jin, Kim T.-W., Minz L., Park S.-O. Fully Digital Beamforming Receiver With a Real-Time Calibration for 5G Mobile Communication. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019, vol. 67, no. 6, pp. 3809–3819. doi: 10.1109/TAP.2019.2902712

3. Hoffman J. P., Veilleux L., Perkovic D., Peral E., Shaffer S. Digital calibration of TR modules for real-time digital beamforming SweepSAR architectures. IEEE Aerospace Conf., Big Sky, USA, MT, 2012, pp. 1–8. doi: 10.1109/AERO.2012.6187084

4. Horst S. J., Hoffman J. P., Perkovic-Martin D., Shaffer S., Thrivikraman T., Yates Ph., Veilleuxet L. Implementation of RF circuitry for real-time digital beamforming SAR calibration schemes. Radar Systems (Radar 2012), IET Intern. Conf., pp. 1–6.

5. Hoffman J. P., Horst S., Perkovic D., Shaffer S., Ghaemi H., Veilleux L. Advances in digital calibration techniques enabling real-time beamforming SweepSAR architectures. IEEE Aerospace Conf., Big Sky, USA, MT, 2013. pp. 1–9. doi: 10.1109/AERO.2013.6497146

6. Hoffman J. P., Horst S., Veilleux L., Ghaemi H., Shaffer S. Digital calibration system enabling real-time on-orbit beamforming. IEEE Aerospace Conf., Big Sky, USA MT, 2014, pp. 1–11. doi: 10.1109/AERO.2014.6836218

7. Jens Reimann, Technique for Concurrent Internal Calibration during Data Acquisition for SAR Systems. Remote Sens. 2020, vol. 12(11), iss. 1773, pp. 1–9. doi: 10.3390/rs12111773

8. Lin Y., Ma Q., Wang S., Bu X., An J. Calibration for spaceborne phased array antennas without interrupting satellite communications. Proc. 9th WCSP, China, 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/WCSP.2017.8171093

9. Hung Tran Viet, Thien Hoang Minh. A real-time internal alibration method for radar systems using digital phase array antennas. INISCOM 2021, LNICST 379, pp. 88–103. doi: 10.1007/978-3-030-77424-0_8

10. Florian RUPPIN. Probability and Statistics Basic concepts. Available at: http://www.mit.edu/~ruppin/Lecture_ESIPAP_Ruppin_2018.pdf (accessed 15.09.2021)

11. Brautigam B., Schwerdt M., Bachmann M., Stangl M. Individual T/R module characterisation of the TerraSAR-X active phased array antenna by calibration pulse sequences with orthogonal codes. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp., 2007, pp. 5202–5205. doi: 10.1109/IGARSS.2007.4424034

12. Silverstein S. D. Application of orthogonal codes to the calibration of active phased array antennas for communication satellites. IEEE Transactions on Signal Processing. 1997, vol. 45, no. 1, pp. 206–218.

13. Surface Mount. Phase Shifter. JSPHS-23+. Available at: https://www.minicircuits.com/pdfs/JSPHS-23+.pdf (accessed 10.07.2021)

14. Yu-Tsung Lo, Chau-Chan Yui, Jean-Fu Kiang. OOK/BPSK-Modulated Impulse Transmitters Integrated With Leakage-Cancelling Circuit. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2013, vol. 61, no. 1, pp. 218–224. doi: 10.1109/TMTT.2012.2226746

15. Surface Mount. Switch. MSW-2-20+. Available at: https://www.minicircuits.com/pdfs/MSW-2-20+.pdf (accessed 10.07.2021)

Information about the authors

Viet Hung Tran, an Engineer specializing in Radar Systems, 2010 at LQD TU, Hanoi, Vietnam, defended a Master's thesis in System Engineering and Control Automation, 2016, at the LQD TU SR Vietnam. A specialist in systems engineering, radio-electronic and radar technology. Area of expertise: microwave equipment and technology; radio-electronic and radar technology, systems engineering. An author of three scientific papers. Postgraduate student in radio electronic technology under the scientific supervision of Bao N. F.
Address: Technical University n. a. Le Qui Don, 236 Hoang Quoc Viet St., Hanoi, Vietnam
E-mail: tranviethung84@gmail.com

Minh Thien Hoang, an Engineer specializing in Radar Systems, 2005 at the LQD TU, Hanoi, Vietnam; defended a Master's thesis in Systems Engineering and Control Automation, 2008 at the LQD TU SR Vietnam; defended a doctoral dissertation in the specialty Microelectronic Technology at TU Electronics and Communication Tokyo, Japan (2015). Area of expertise: microwave technology and technology; radio electronic and radar technology; systems engineering; microelectronic technology; telecommunications. An author of six scientific papers.
Address: Technical University n. a. Le Qui Don, 236 Hoang Quoc Viet St., Hanoi, Vietnam
E-mail: thienhm.isi@lqdtu.edu.vn, nguyenphungbao@lqdtu.edu.vn; baonp@imc.org.vn

Книжные новинки

Григорьев Андрей Дмитриевич

Терагерцевая электроника

ISSN: 978-5-9221-1882-8
Издательство: Физматлит, 2021 г.
Страницы: 308 (офсет)

В книге рассматриваются свойства электромагнитного излучения терагерцевого диапазона и особенности его взаимодействия с веществом. Показаны причины появления так называемого терагерцевого провала, в котором выходная мощность как квантовых, так и классических источников излучения минимальна по сравнению с соседними диапазонами частот. Дается классификация источников излучения терагерцевого диапазона. Подробно рассмотрены квантовые источники терагерцевого излучения, включая квантовые каскадные лазеры, молекулярные лазеры и генераторы на эффекте Джозефсона. Показано, что использование новых широкозонных полупроводниковых материалов позволяет существенно увеличить рабочую частоту и выходную мощность полупроводниковых генераторов и усилителей, подняв их максимальную рабочую частоту вплоть до нескольких терагерц. Подробно рассмотрены проблемы продвижения вакуумных микроволновых приборов в терагерцевый диапазон частот. Наряду с уже известными источниками – гирорезонансными приборами и лазерами на свободных электронах описаны «классические» микроволновые приборы – клистроны, лампы бегущей и обратной волн, магнетроны и оротроны. Изложены современное состояние этих приборов и перспективы продвижения их в терагерцевый диапазон. Приведены также сведения о конструкции и параметрах детекторов терагерцевого излучения. В приложениях приведены основные сведения об электродинамических и электронно-оптических системах вакуумных электронных приборов, а также о некоторых новых технологиях изготовления их деталей.

Телевидение и обработка изображений

УДК 004.932 Оригинальная статья

https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-4-27-36

Метод автоматизированного контроля электронных компонентов на микрофокусных рентгеновских снимках

Н. Е. Староверов✉

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

✉ nestaroverov@etu.ru

Аннотация

Введение. Все более популярным становится внедрение в промышленность систем машинного зрения, особенно это актуально для контроля электронных компонентов. Одним из наиболее широко распространенных видов неразрушающего контроля является рентгеновский. Поскольку рассматриваемые электронные компоненты, как правило, имеют небольшой размер, то для повышения информативности контроля выполнять их рентгенографию целесообразно по схеме съемки с увеличением изображения. Специфика рентгеновской аппаратуры для выполнения таких исследований предполагает сравнительно небольшие входные дозы рентгеновского излучения в плоскости приемника, что обуславливает более высокую зашумленность снимков, чем при традиционной рентгенографии.

Цель работы. Разработка метода автоматизированного поиска объектов на микрофокусных рентгеновских снимках.

Методы и материалы. Предложен метод сегментации рентгеновских изображений. На первом шаге выполняется адаптивная медианная фильтрация, на втором шаге – коррекция фона изображения путем вычитания искажающей функции. Далее выделяются контуры объектов на изображении по методу Кэнни, затем на полученном изображении определяются объекты.

Результаты. Разработанный метод был апробирован в задаче контроля качества установки микросхем и в задаче определения числа электронных компонентов. Эксперименты подтвердили корректность работы предлагаемого метода. Было выявлено, что при определении качества установки микросхем количество обнаруженных дефектов отличается от верифицированных оператором не более чем на 10 %, при определении количества электронных компонентов предложенным методом средняя ошибка составила менее 0.1 %.

Заключение. Представленный метод определения объектов на микрофокусных рентгеновских снимках продемонстрировал достаточную точность в типичных задачах неразрушающего контроля электронных компонентов.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, неразрушающий контроль, электронные компоненты, цифровая обработка изображений

Для цитирования: Староверов Н. Е. Метод автоматизированного контроля электронных компонентов на микрофокусных рентгеновских снимках // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 27–36. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-27-36

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 18.05.2021; принята к публикации после рецензирования 28.06.2021; опубликована онлайн 29.09.2021

© Староверов Н. Е., 2021

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

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 27–36
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 27–36

Television and Image Processing

Original article

A Method for Automated Control of Electronic Components on Microfocus X-ray Images

Nikolay E. Staroverov✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ nestaroverov@etu.ru

Abstract

Introduction. Machine vision systems are increasingly used in industrial production, particularly for monitoring the quality of electronic components. Radiographic (X-ray) inspection is currently one of the most popular types of non-destructive testing. Electronic components are typically characterized by a small size, hence, their radiographic inspection should be based on obtaining images and their further enlargement. X-ray equipment for performing such studies is designed such that there are relatively small input doses of X-ray radiation in the plane of the receiver, which leads to a higher image noise than that using conventional X-ray devices.

Aim. To develop a method for automated object recognition on microfocus X-ray images.

Materials and methods. A method for segmentation of X-ray images is proposed. In the first step, adaptive median filtering is performed followed by correction of the image background by subtracting the distorting function. Next, the contours of the objects in the image are identified using the Canny edge detector followed by recognition of the objects on the resulting image.

Results. The developed method was tested for quality control of the installation of microcircuits and for determining the number of electronic components. The experiments confirmed the accuracy of the proposed method. When monitoring the quality of microcircuit installation, the number of detected defects differed from that verified by the operator by less than 10 %. The average error of the proposed method was less than 0.1% when determining the number of electronic components.

Conclusion. The proposed method for object recognition on microfocus X-ray images demonstrated sufficient accuracy in typical tasks of non-destructive testing of electronic components.

Keywords: X-ray radiation, non-destructive testing, electronic components, digital image processing

For citation: Staroverov N. E. A Method for Automated Control of Electronic Components on Microfocus X-ray Images. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 27–36. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-27-36

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

Submitted 18.05.2021; accepted 28.06.2021; published online 29.09.2021

Введение. Все более популярным становится внедрение в промышленность систем машинного зрения, особенно это актуально для контроля электронных компонентов. Одним из наиболее широко распространенных видов неразрушающего контроля является рентгеновский, а одна из наиболее часто возникающих задач при неразрушающем контроле электронных компонентов – контроль качества пайки микросхем BGA (Ball Grid Array). На корпусе такой микросхемы с обратной стороны находится массив шариков припоя. Микросхема устанавливается на контактную площадку печатной платы, затем выполняется пайка. Проконтролировать результаты пайки визуально невозможно, поэтому основным методом контроля таких соединений является рентгеновский. Автоматизированный анализ пайки BGA-микросхем подробно рассмотрен в [1–4]. В [1] выделены основные параметры объектов на изображении, отвечающие за качество пайки, проведен анализ дефектов. Показаны методы автоматизированного определения таких дефектов пайки, как отклонение паяного соединения от круглой формы и короткого замыкания выводов.

Поскольку рассматриваемые электронные компоненты, как правило, имеют небольшой размер, то для повышения информативности контроля выполнять их рентгенографию целесообразно по схеме съемки с увеличением изображения [5–8]. Для того чтобы получить резкие рентгеновские снимки

по схеме с увеличением изображения, требуется использовать микрофокусные источники рентгеновского излучения (размер фокусного пятна менее 100 мкм – ГОСТ Р МЭК 60336–2010) [6]. Специфика рентгеновской аппаратуры для выполнения таких исследований предполагает сравнительно небольшие входные дозы рентгеновского излучения в плоскости приемника, что обуславливает более высокую зашумленность снимков, чем при традиционной рентгенографии. Кроме того, схема съемки с увеличением изображения предполагает неравномерный фон рентгеновского снимка.

Исходя из вышеизложенного, для автоматизированного анализа микрофокусных рентгеновских снимков требуется разработка специализированных методик, так как применение традиционных может не приводить к желаемым результатам.

В [2] предпринята попытка контроля установки BGA-микросхем при помощи специализированного фильтра. У этого метода есть очевидное достоинство – высокая точность анализа, однако использование такой фильтрации требует большого количества вычислительных ресурсов и достаточно много времени для анализа.

Еще одной важной задачей при неразрушающем рентгеновском контроле является определение числа электронных компонентов в упаковке или на плате. Методы, обеспечивающие контроль числа компонентов, реализованы в программном обеспечении крупных производителей рентгеновского оборудования, например Nordson Dage, однако алгоритмы, которые использованы для этого, представляют коммерческую тайну и не опубликованы в открытых источниках.

Таким образом, актуальным представляется создание универсального метода выделения объектов в задачах неразрушающего контроля электронных компонентов при помощи микрофокусной рентгенографии.

Алгоритм сегментации рентгеновских изображений. Одной из основных задач, которые должны быть решены для выполнения автоматического анализа изображений, является сегментация. Рентгенография при помощи микрофокусных источников рентгеновского излучения позволяет получать снимки с прямым увеличением изображения. Однако снимки с увеличением изображения характеризуются неравномерным фоном изображения и увеличенным по сравнению с традиционной рентгенографией шумом изображения, поэтому для микрофокусных снимков требуются специализированные алгоритмы сегментации.

На рис. 1 представлен алгоритм сегментации для микрофокусных рентгеновских изображений. На первом шаге выполняется адаптивная медианная фильтрация, алгоритм, представленный в [9], был изменен для корректной работы с микрофокусными рентгеновскими изображениями. На втором шаге выполняется коррекция фона изображения путем вычитания искажающей функции. Далее выделяются контуры объектов на изображении по методу Кэнни [10], затем на полученном изображении определяются объекты. Далее методы, входящие в алгоритм, будут рассмотрены подробнее.

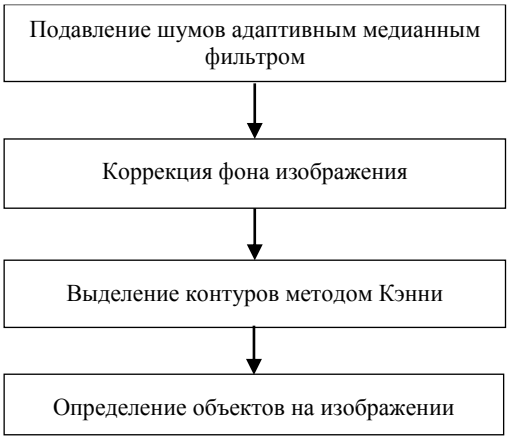


Рис. 1. Алгоритм сегментации рентгеновских изображений

Fig. 1. Algorithm for segmentation of X-ray images

Адаптивный медианный фильтр. На сегодняшний день для шумоподавления на рентгеновских снимках чаще всего используются усредняющие фильтры или фильтры, основанные на порядковых статистиках (чаще всего медианные фильтры). Однако эти методы имеют значительные недостатки: слабое подавление импульсных шумов и искажение деталей на изображении. Этих недостатков лишен модифицированный адаптивный медианный фильтр.

Адаптивный медианный фильтр работает по алгоритму, представленому на рис. 2. Здесь $Z_{\min}$ и $Z_{\max}$ – минимальное и максимальное значения яркости в окрестности S; Z_{med} – медиана яркости в окрестности S; Z_{p} – значение яркости обрабатываемого пикселя; $S_{\max}$ – максимально допустимый размер окрестности. Алгоритм работает следующим образом: вначале происходит проверка,

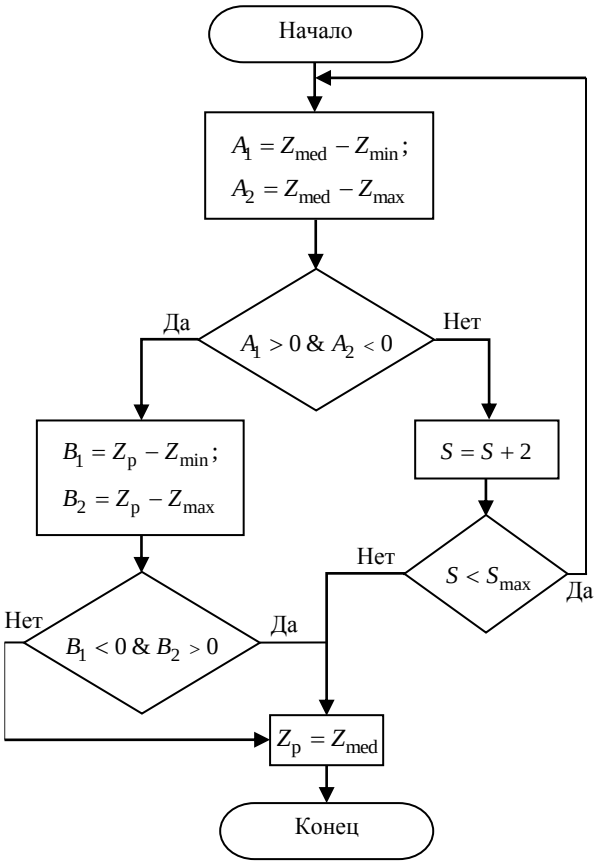


Рис. 2. Алгоритм адаптивного медианного фильтра

Fig. 2. Adaptive median filter algorithm

является ли медиана локальным минимумом или максимумом: если является, то, значит, выполнять фильтрацию нельзя и следует увеличить размер окрестности; если нет, то происходит переход к оценке центрального значения. В блоке оценки центрального значения проверяется, является ли значение яркости пикселя максимумом или минимумом окрестности: если является, то яркость пикселя меняется на медиану; если нет, то остается без изменений.

Рассмотренный фильтр подавляет шумы и при этом сохраняет значительно больше деталей изображения, чем обыкновенный медианный фильтр. Однако при фильтрации микрофокусных рентгеновских изображений было обнаружено, что в ряде случаев фильтр недостаточно эффективно удаляет шумы, например когда в окрестности не 1 зашумленный пиксель. В этом случае шумы остаются на изображении. Такое может происходить, если в приемнике изображения перестают работать несколько близко расположенных пикселей или если на люминесцирующий экран попадают мелкие металлические частицы. Для улучшения работы рассмотренного фильтра было предложено заменить в блоке проверки центрального значения минимальное и максимальное значения яркости в окрестности S на значения яркости, идущие после минимума и перед максимумом (второй минимум и второй максимум) соответственно.

Коррекция фона изображения. При выполнении рентгенографии по схеме с прямым геометрическим увеличением возникает неравномерный фон изображения. В случае традиционной рентгенографии неравномерность фона невелика (не более 10 %), при съемке с увеличением изображения неравномерность фона может достигать 50 %. Объясняется это тем, что интенсивность рентгеновского излучения убывает пропорционально квадрату расстояния от центра фокусного пятна до точки, где осуществляется регистрация. Таким образом, на краях приемника изображения интенсивность рентгеновского излучения значительно меньше, чем в центре.

Неравномерный фон снимка существенно усложняет автоматизированный анализ рентгеновских изображений. Для устранения неравномерного фона изображения можно представить полученное изображение как сумму истинного изображения и искажающей функции. Искажающую функцию можно описать выражением

$$g(x,y) = C\left[\frac{(x - x_{max})^2}{2} + \frac{(y - y_{max})^2}{2}\right],$$

где C – константа, зависящая от параметров приемника излучения и режима работы рентгеновской трубки; x, y – координаты пикселя изображения; x_{max} и y_{max} – размеры изображения.

Для определения константы C применяется следующий метод: по всем сторонам изображения на удалении 20 пикселей от края строятся профили, затем выполняется проверка профилей на разрывы первого рода. Если разрывы есть, то такой профиль исключается из рассмотрения. Для каждого профиля определяются минимум и максимум, находится их разность. Константа C определяется как средняя разность между минимумом и максимумом профилей по выражению

$$C = \frac{\sum_{k}^{N} a_{k_max} - a_{k_min}}{N},$$

где N – число профилей; a_{k_max} и a_{k_min} – максимальное и минимальное значения яркости профиля k соответственно. Результат применения операции коррекции фона иллюстрируется рис. 3.

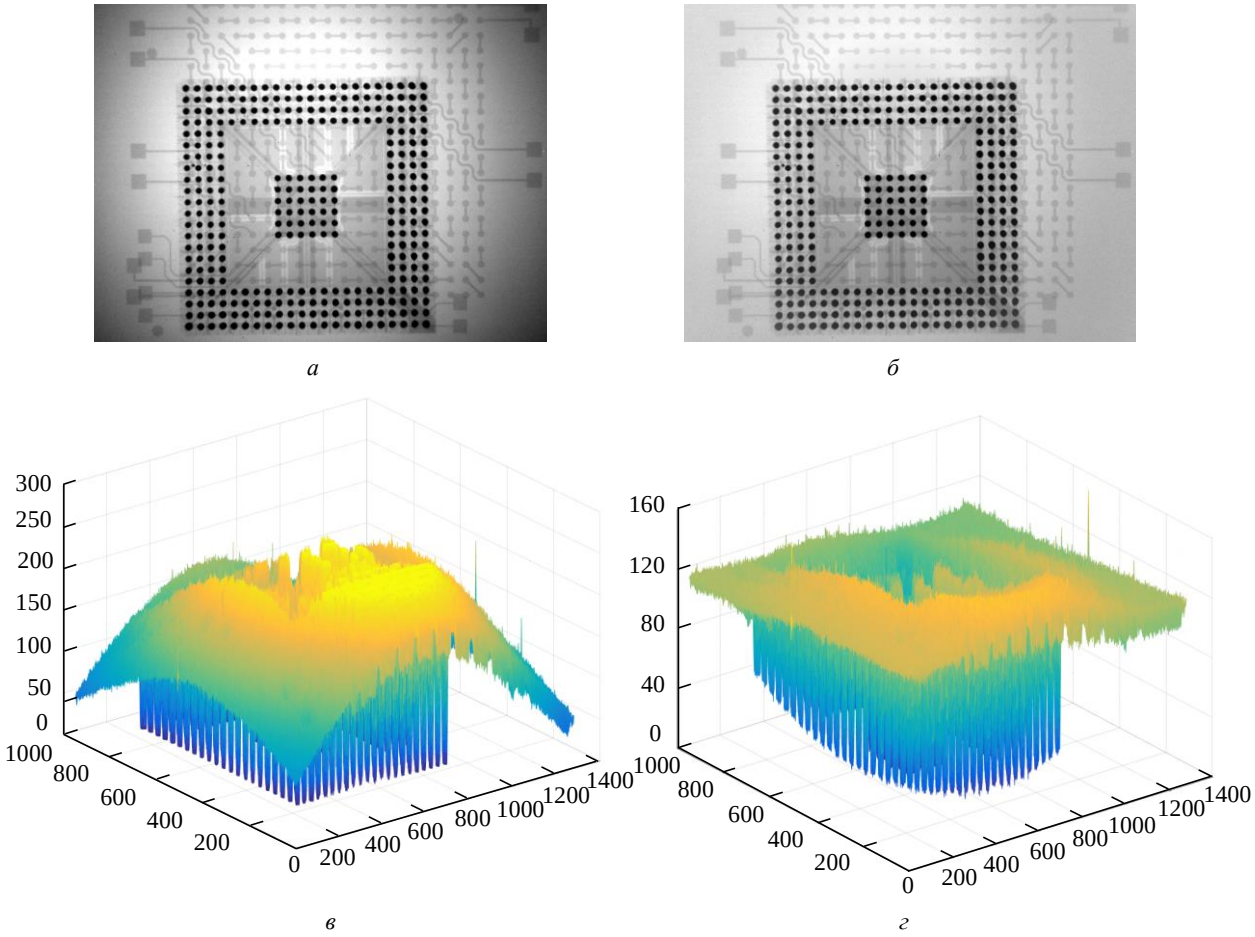


Рис. 3. Рентгеновский снимок микросхемы: *а* – исходное изображение; *б* – изображение после коррекции фона; *в* – поверхность, построенная по исходному изображению; *г* – поверхность, построенная по изображению после коррекции фона

Fig. 3. X-ray image of the chip: *а* – original image; *б* – image after background correction; *в* – the surface constructed from the original image; *г* – the surface constructed from the image after background correction

Как видно из рис. 3, фон изображения стал равномерным, что делает возможным его автоматизированный анализ.

Выделение контуров на изображении. Для выделения контуров на изображении был модифицирован алгоритм Кэнни. Для разработки этого алгоритма были использованы следующие критерии: детектор должен реагировать на границы, но при этом игнорировать ложные; точно определять линию границы (без ее фрагментирования); реагировать на каждую границу только один раз, что позволяет не воспринимать полосы плавного изменения яркости как совокупности границ. В [10] показано, что приближенное решение задачи определения контуров на изображении можно получить, если сначала сгладить изображение фильтром Гаусса:

$$G(x,y)=e^{\frac{-\left(x^2+y^2\right)}{2\sigma^2}},$$

где $G(x,y)$ – функция Гаусса; (x,y) – координаты пикселя; σ – произвольное положительное число. Затем при помощи оператора Собела (который сверткой с соответствующим ядром выделяет градиенты яркости) [11] найдем градиенты по вертикали и горизонтали. Обозначим сглаженное изображение как $S(x, y)$, тогда модуль и угол градиента вычисляются по формулам

$$G_x=\frac{\partial S}{\partial x};\ G_y=\frac{\partial S}{\partial y};$$

$$F(x,y)=\sqrt{G_x^2+G_y^2};$$

$$A(x,y)=\arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right),$$

где $F(x,y)$ – модуль градиента; $A(x,y)$ – угол градиента.

В классическом алгоритме на следующем этапе на изображении $F(x, y)$ выполняется подавление немаксимальных точек (не являющихся локальным максимумом в окрестности), что необходимо для утончения контура. В данной статье этот этап реализован при помощи математической морфологии, а именно операции эрозии.

Эрозия множества A по множеству B – это множество таких точек z, при сдвиге в которые множество B будет полностью содержаться в A. Для бинарного изображения морфологическая эрозия определяется выражением

$$A \ominus B = \{z \mid (B)_z \subseteq A\}.$$

Данная операция выполняется быстрее, чем подавление немаксимальных точек.

Заключительный этап алгоритма – пороговая обработка изображения для удаления ложных контуров. В отличие от используемого в оригинальном алгоритме двойного порога был использован динамический порог, описанный в [12], что позволило отказаться от лишних параметров. Реализация алгоритма подробно рассмотрена в [13].

Определение объектов. Для определения объектов на изображении использовалось бинарное изображение, полученное на предыдущем этапе. Затем методом обхода границы для каждой замкнутой области устанавливались точки, ей принадлежащие. В результате выполнения алгоритма были получены координаты точек, принадлежащих границам объектов на изображении.

Метод контроля качества установки BGA-микросхем. Описанный алгоритм может быть применен для сегментации микрофокусных рентгеновских снимков в широком круге задач, решаемых при помощи компьютерного зрения, а именно метода контроля качества установки BGA-микросхем и метода определения количества электронных компонентов в упаковке.

Для решения этой задачи к рентгеновским снимкам применялся разработанный алгоритм, после чего были получены границы объектов на изображении. Рентгеновское изображение после выделения контуров показано на рис. 4.

В данной статье выполнен поиск следующих дефектов пайки:

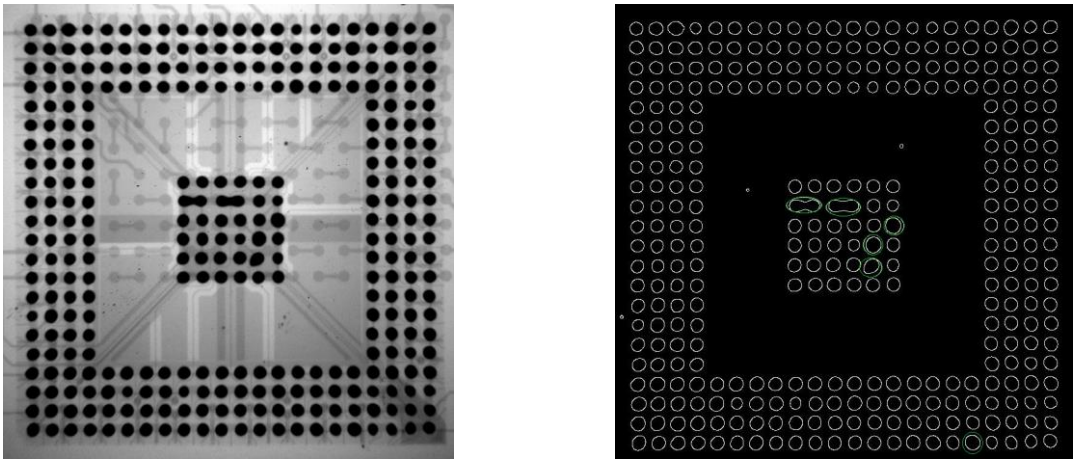
1. Короткие замыкания соседних выводов.

2. Отклонения формы паяного соединения от круга на 25 % и более.

3. Наличие пустот в паяном соединении более 10 % площади.

Для определения коротких замыканий в паяных соединениях анализируются периметры всех имеющихся на изображении объектов. Вычисляется медиана всех периметров. Если периметр объекта существенно отличается от медианы в большую сторону, то такой объект признается коротким замыканием.

Для проверки формы паяного соединения для каждого объекта на изображении требуется найти его площадь. Площадь каждого объекта определяется как все точки, лежащие внутри его границы.



а *б*

Рис. 4. Рентгеновский снимок микросхемы: *а* – исходное рентгеновское изображение; *б* – бинарное изображение с выделенными объектами

Fig. 4. X-ray image of the chip: *а* – the original X-ray image; *б* – binary image with selected objects

Для контроля формы паяного соединения используется коэффициент округлости, который определяется по выражению

$$R = \frac{4\pi S}{P^2},$$

где S – площадь объекта; P – периметр объекта. Для круга R будет равен 1. При отклонении его значения от 1 более чем на 25 % объект признается дефектом пайки. Для определения пустот в паяном соединении не представляется возможным пользоваться методами определения краев на изображении, так как контраст областей слишком мал и получить связные контуры внутри шаров припоя затруднительно. Вместо этого используется оценка дисперсии яркости внутри каждого объекта на снимке.

Вероятность обнаружения k-уровня яркости на снимке, математическое ожидание и дисперсия определяются выражениями [14]

$$p(z_k) = \frac{n_k}{N};$$

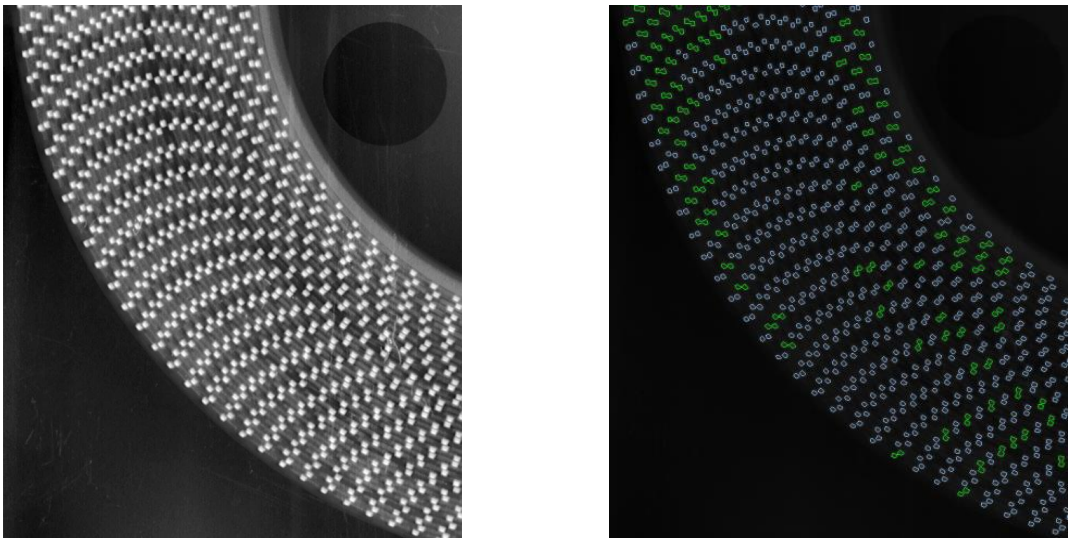
$$M = \sum_{k=0}^{L-1} z_k p(z_k);$$

$$D = \sum_{k=0}^{L-1} (z_k - M)^2 p(z_k),$$

где z_k – k-уровень яркости; N – количество пикселей, принадлежащих объекту; L – общее количество уровней яркости объекта. При наличии пустот в паяном соединении дисперсия яркости объекта значительно возрастает, поэтому такие объекты могут быть отмечены как дефекты пайки.

Метод определения количества электронных компонентов. При автоматическом монтировании электронных компонентов на печатную плату часто возникает задача контроля количества оставшихся компонентов SMD (Surface Mounted Device). Такой контроль довольно затруднительно осуществить вручную, поэтому для этой задачи широко используется рентгенография. Выполнив рентгенографический анализ упаковки с компонентами, можно определить их число.

Для решения этой задачи может быть применен разработанный алгоритм сегментации рентгеновских изображений. Однако при съемке с невысоким коэффициентом увеличения на приемник с размером пикселя 100 мкм и более требуется специализированная обработка изображения. Невысокий коэффициент увеличения обусловлен значительными линейными размерами исследуемого объекта. Часть рентгеновского снимка упаковки электронных компонентов приведена на рис. 5, *а*. Как видно из рисунка, некоторые компоненты сливаются друг с другом, что делает невозможным прямой подсчет их численности как числа объектов на изображении. Однако, построив



а *б*

Рис. 5. Рентгеновский снимок электронных компонентов: *а* – исходное изображение; *б* – изображение с выделенными компонентами

Fig. 5. X-ray of electronic components: *а* – the original image; *б* – image with selected components

Табл. 1. Результаты экспериментальной проверки метода определения качества установки BGA-микросхем

Table 1. Experimental verification of the method for determining the quality of BGA microcircuit installation

Характеристики микросхем	Определено оператором			Определено алгоритмом			Средняя ошибка, %
Количество выводов микросхемы	180	324	484	180	324	484	0
Количество микросхем	12	35	23	12	35	23	0
Короткие замыкания соседних выводов	3	4	4	3	4	4	0
Отклонения формы паяного соединения от круга на 25 % и более	18	12	2	18	10	1	9
Наличие пустот в паяном соединении более 10 % площади	16	14	14	14	10	13	9.3

Табл. 2. Результаты экспериментальной проверки метода определения количества компонентов

Table 2. Experimental verification of the method for determining the number of components

Компоненты	Тип корпуса	Истинное значение	Значение, определенное алгоритмом	Ошибка, %	Истинное значение	Значение, определенное алгоритмом	Ошибка, %
Конденсаторы	0402	5000	5001	0.02	4673	4675	0.0043
Конденсаторы	0603	5000	5000	0	4237	4237	0
Резисторы	0402	5000	5000	0	4587	4583	0.0087
Резисторы	0603	5000	4999	0.02	3456	3456	0.0039
Диоды	sot23	5000	5002	0.04	2567	2568	0.026
Диоды	sod123	5000	5001	0.02	3892	3891	0.026

гистограмму распределения числа объектов от их площади, можно видеть, что объекты разделены на два класса: первый класс – объект есть один электронный компонент; второй класс – два компонента.

Для того чтобы разделить эти два класса, можно найти оптимальный порог. Оптимальным будет порог, максимизирующий межклассовую дисперсию. Для этого использовался алгоритм, предложенный в [15].

На рис. 5, *б* показан снимок с наложенными на него контурами объектов. Синими контурами отмечены объекты, которые распознаны как один компонент, зелеными – объекты, распознанные как два компонента.

Обсуждение результатов. Экспериментальная проверка метода контроля качества установки BGA-микросхем проводилась при помощи набора данных, собранных на кафедре ЭПУ СПбГЭТУ "ЛЭТИ". Для проверки были использованы 70 микрофокусных рентгеновских снимков BGA-компонентов, полученных с помощью установки для контроля изделий микроэлектроники "Орел".

Как видно из табл. 1, различие количества дефектов, определенных оператором и алгоритмом не превышает 10 %.

Экспериментальная проверка метода определения количества электронных компонентов проводилась при помощи рентгеновской установки ПРДУ, предназначенной для различных рентгенографических исследований, в частности для неразрушающего контроля электронных компонентов. Результаты экспериментальной проверки метода представлены в табл. 2. Ошибка не превышает 0.01 от числа компонентов, что является приемлемым результатом.

Заключение. Был разработан метод автоматизированного контроля электронных компонентов на микрофокусных рентгеновских снимках. Микрофокусные рентгеновские снимки имеют специфические особенности, которые потребовали разработки специализированного алгоритма сегментации. Метод имеет небольшое количество параметров, что позволяет использовать его практически без участия оператора.

Предложенный метод был применен для решения двух практических задач: контроля качества пайки BGA-компонентов и определения количества электронных компонентов при помощи рентгенографии. В обоих случаях метод продемонстрировал удовлетворительные результаты, поэтому он может быть интегрирован в промышленную рентгеновскую аппаратуру.

Список литературы

1. Laghari M. S., Memon Q. A. Identification of faulty BGA solder joints in X-ray images // Intern. J. of Future Computer and Communication. 2015. Т. 4, № 2. P. 122–125. doi: 10.7763/IJFCC.2015.V4.369

2. Shao-hu Peng, Hyun Do Nam. Void defect detection in ball grid array X-ray images using a new blob filter // J. of Zhejiang University SCIENCE C. 2012. Vol. 13, № 11. P. 840–849. doi: 10.1631/jzus.C1200065

3. Detection of defects at BGA solder joints by using X-ray imaging / T. Sumimoto, T. Maruyamay, Y. Azuma, S. Goto, M. Mondo, N. Furukawa, S. Okada // IEEE Intern. Conf. on Industrial Technology, 2002. IEEE ICIT'02. IEEE, 2002. Vol. 1. P. 238–241. doi: 10.1109/ICIT.2002.1189898

4. Türer Akdeniz C., Dokur Z., Ölmez T. Detection of BGA solder defects from X-ray images using deep neural network // Turkish J. of Electrical Engineering & Computer Sciences. 2020. Vol. 28, iss. 4. P. 2020–2029. doi: 10.3906/elk-1910-135

5. Staroverov N. E., Gryaznov A. Y., Kholopova E. D. Digital x-ray image processing with using adaptive histogram equalization and adaptive background correction // Биомедицинская радиоэлектроника. 2018. № 5. P. 56–58.

6. Мазуров А. И., Потрахов Н. Н. Возможности и ограничения микрофокусной рентгенографии в медицине //Биотехносфера. 2010. № 4. С. 20–24.

7. Микрофокусная рентгенография в медицине: физико-технические особенности и современные средства рентгенодиагностики / Н. Н. Потрахов, А. Ю. Грязнов, К. К. Жамова, В. Б. Бессонов, А. В. Ободовский, Н. Е. Староверов, Е. Д. Холопова // Биотехносфера. 2015. № 5 (41). С. 55–63.

8. Грязнов А. Ю., Потрахов Е. Н., Потрахов Н. Н. Портативная установка для рентгеновского экпресс-контроля качества пищевой продукции // Биотехносфера. 2009. № 6. С. 26–28.

9. Гонсалес Р. С., Вудс Р. Е. Цифровая обработка изображений / пер. с англ. Л. И. Рубанова, П. А. Чочиа. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.

10. Canny J. A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1986. Vol. PAMI-8, № 6. P. 679–698.

11. Vincent O. R., Folorunso O. A descriptive algorithm for sobel image edge detection // Proc. of informing science & IT education conference (InSITE). Informing Science Institute California, 2009. Т. 40. P. 97–107. doi: 10.28945/3351

12. Xuan L., Hong Z. An improved canny edge detection algorithm // 8th IEEE intern. Conf. on software engineering and service science (ICSESS). IEEE, Shenyang, China, 2017. P. 275–278. doi: 10.1109/ICSESS.2017.8342913

13. Dynamic thresholding based adaptive canny edge detection / F. Hossain, M. Asaduzzaman, Md. A. Rahman, M. A. Yousuf // Intern. J. of Computer Applications. 2016. Vol. 135, iss. 4. P. 37–41. doi: 10.5120/ijca2016908337

14. Peebles P. Z., Shi B. E. Probability Random Variables and Random Signal Principles / ed. by S. W. Director // McGraw-Hill Series in Electrical Engineering. 2015. 349 p.

15. A fast 2D otsu thresholding algorithm based on improved histogram / N. Zhu, G. Yang, W. Dai, G. Wang // Chinese Conf. on pattern recognition. IEEE, 2009. P. 1–5. doi: 10.1109/CCPR.2009.5344078

Информация об авторе

Староверов Николай Евгеньевич – аспирант 4-го года обучения, ассистент кафедры электронных приборов и устройств. Окончил магистратуру (2017) по направлению "Электроника и наноэлектроника" Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 20 научных работ. Сфера научных интересов – рентгеновские методы контроля и диагностики.
Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: nestaroverov@etu.ru

References

1. Laghari M. S., Memon Q. A. Identification of faulty BGA solder joints in X-ray images. Intern. J. of Future Computer and Communication. 2015, vol. 4, no. 2, pp. 122–125. doi: 10.7763/IJFCC.2015.V4.369

2. Shao-hu Peng, Hyun Do Nam Void defect detection in ball grid array X-ray images using a new blob filter. J. of Zhejiang University SCIENCE C. 2012, vol. 13, no. 11, pp. 840–849. doi: 10.1631/jzus.C1200065

3. Sumimoto T., Maruyamay T., Azuma Y., Goto S., Mondo M., Furukawa N., Okada S. Detection of defects at BGA solder joints by using X-ray imaging. IEEE Intern. Conf. on Industrial Technology, 2002. IEEE ICIT'02. IEEE, 2002, vol. 1, pp. 238–241. doi: 10.1109/ICIT.2002.1189898

4. Türer Akdeniz C., Dokur Z., Ölmez T. Detection of BGA solder defects from X-ray images using deep neural network. Turkish J. of Electrical Engineering & Computer

Sciences. 2020, vol. 28, iss. 4, pp. 2020–2029. doi: 10.3906/elk-1910-135

5. Staroverov N. E., Gryaznov A. Y., Kholopova E. D. Digital x-ray image processing with using adaptive histogram equalization and adaptive background correction. J. Biomedical Radioelectronics. 2018, no. 5, pp. 56–58.

6. Mazurov A. I., Potrakhov N. N. Possibilities and limitations of microfocus radiography in medicine. J. Biotechnosphere. 2010, no. 4, pp. 20–24.

7. Potrakhov N. N., Gryaznov A. Yu., Zhamova K. K., Bessonov V. B., Obodovsky A. V., Staroverov N. E., Kholopova E. D. Microfocus radiography in medicine: physical and technical features and modern means of X-ray diagnostics. J. Biotechnosphere. 2015, no. 5 (41), pp. 55–63.

8. Gryaznov A. Yu., Potrakhov E. N., Potrakhov N. N. Portable installation for X-ray express-quality control of food products. J. Biotechnosphere. 2009, no. 6, pp. 26–28.

9. Gonzalez R. S., Woods R. E. Digital image processing. Ed. by L. I. Rubanov, P. A. Chochia. M., *Technosphera,* 2012, 1104 p.

10. Canny J. A computational approach to edge detection. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1986, vol. PAMI-8, no. 6, pp. 679–698.

11. Vincent O. R., Folorunso O. A descriptive algorithm for sobel image edge detection. Proc. of informing science & IT education conference (InSITE). Informing Science Institute California. 2009, vol. 40, pp. 97–107. doi: 10.28945/3351

12. Xuan L., Hong Z. An improved canny edge detection algorithm. 8th IEEE intern. Conf. on software engineering and service science (ICSESS). IEEE, Shenyang, China, 2017, pp. 275–278. doi: 10.1109/ICSESS.2017.8342913

13. Hossain F., Asaduzzaman M., Rahman Md. A., Yousuf M. A. Dynamic thresholding based adaptive canny edge detection. Intern. J. of Computer Applications. 2016, vol. 135, iss. 4, pp. 37–41. doi: 10.5120/ijca2016908337

14. Peebles P. Z., Shi B. E. Probability Random Variables and Random Signal Principles. Ed. by S. W. Director. McGraw-Hill Series in Electrical Engineering, 2015, 349 p.

15. Zhu N., Yang G., Dai W., Wang G. A fast 2D otsu thresholding algorithm based on improved histogram. Chinese Conf. on pattern recognition. IEEE, 2009, pp. 1–5. doi: 10.1109/CCPR.2009.5344078

Information about the author

Nikolay E. Staroverov, Post-graduate student of fourth year, assistant at the Department of Electronic Systems and Devices. Graduated from the magistracy (2017) in the direction of "Electronics and nanoelectronics" of the Saint Petersburg Electrotechnical University. Author of 20 scientific papers. Area of expertise: X-ray methods of control and diagnostics.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia
E-mail: nestaroverov@etu.ru

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 37–47
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 37–47

Электродинамика, микроволновая техника, антенны
УДК 621.396.67.012.12 Оригинальная статья
https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-4-37-47

Разборная отражательная антенная решетка Ku-диапазона частот на основе микрополоскового элемента в виде мальтийского креста

С. В. Поленга✉, Р. О. Рязанцев, А. Д. Полигина, Р. М. Крылов, Е. А. Литинская, Ю. П. Саломатов

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

✉ twinlive@gmail.com

Аннотация

Введение. Отражательные антенные решетки (ОАР) обладают рядом конструктивных и функциональных преимуществ относительно ближайшего аналога – зеркальных антенн (ЗА). Наиболее предпочтительными элементами ОАР являются микрополосковые, однако однослойные микрополосковые элементы зачастую не позволяют точно скорректировать фазу в ОАР из-за ограниченного диапазона фазовой регулировки и высокой крутизны фазовой кривой. Использование многослойных элементов заметно усложняет и удорожает конструкцию антенны. В связи с этим актуален поиск однослойных элементов, обеспечивающих фазовую регулировку более 360° с малой крутизной фазовой кривой.

Цель работы. Разработка однослойного микрополоскового фазокорректирующего элемента отражательного типа с диапазоном регулировки более 360° и создание на его основе ОАР для работы в сетях спутниковой связи.

Материалы и методы. Численные исследования проведены методом конечных элементов и методом конечных разностей во временно́й области. Характеристики направленности измерялись сканированием ближнего поля в безэховой камере.

Результаты. Разработан фазокорректирующий элемент на основе однослойного микрополоскового резонатора в виде мальтийского креста с близкой к линейной зависимостью фазы отраженной волны от размера элемента, обеспечивающий диапазон фазовой регулировки более 360°. На основе исследованного элемента разработана и изготовлена разборная конструкция ОАР, в которой рефлектор состоит из четырех подрешеток, что обеспечивает компактное свертывание ОАР для транспортировки. Результаты экспериментальных исследований показали высокую эффективность ОАР, коэффициент усиления (КУ) которой на 1.5 дБ ниже КУ ЗА идентичных габаритных размеров в относительной полосе рабочих частот (ОПРЧ) 7 %. ОПРЧ ОАР по уровню снижения КУ на 1 дБ составила 11 %.

Заключение. На основе элемента в виде мальтийского креста возможна реализация однослойных ОАР с ОПРЧ более 10 %. Разработанный макет показал возможность создания высокоэффективных сворачиваемых ОАР для работы в составе терминалов спутниковой связи и телевидения.

Ключевые слова: отражательная антенная решетка, ячейка Флоке, микрополосковый элемент

Для цитирования: Разборная отражательная антенная решетка Ku-диапазона частот на основе микрополоскового элемента в виде мальтийского креста / С. В. Поленга, Р. О. Рязанцев, А. Д. Полигина, Р. М. Крылов, Е. А. Литинская, Ю. П. Саломатов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 37–47. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-37-47

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-47-240003.

Статья поступила в редакцию 10.06.2021; принята к публикации после рецензирования 08.07.2021; опубликована онлайн 25.09.2021

© Поленга С. В., Рязанцев Р. О., Полигина А. Д., Крылов Р. М., Литинская Е. А., Саломатов Ю. П., 2021

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

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 37–47
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 37–47

Electrodynamics, Microwave Engineering, Antennas

Original article

A Ku-Band Foldable Reflectarray Based on a Maltese-Cross Microstrip Element

Stanislav V. Polenga✉, Roman O. Ryazantsev, Anastasiya D. Poligina, Roman M. Krylov, Elena A. Litinskaya, Yury P. Salomatov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

✉ twinlive@gmail.com

Abstract

Introduction. Reflectarrays have a number of design and functional advantages over their closest analogue - reflector antennas (RA). Although microstrip elements are the most preferred reflectarray elements, single-layer microstrip elements do not allow accurate phase control due to the limited phase adjustment range and a high phase slope. The use of multilayer elements significantly complicates the antenna design and increases its cost. The development of a single-layer element that allows more than 360° phase adjustment and a low phase curve slope is urgent.

Aim. To develop a single-layer microstrip phase-correcting element with a phase adjustment range of more than 360° and to design a reflectarray on its basis for operation in satellite communication networks.

Materials and methods. Numerical studies were carried out using finite element analysis and the finite-difference time-domain method. Radiation patterns were measured using the near-field scanning method in an anechoic chamber.

Results. A phase-correcting element based on a single-layer Maltese cross-shaped microstrip element with close to linear dependence of element size on the phase of the reradiated wave and more than 360° phase adjustment range was developed. On the basis of the investigated element, a foldable reflectarray was designed. The reflector consists of four subarrays, which provide its compact folding for transportation. The results of experimental studies confirmed a high efficiency of the reflectarray, the gain of which is 1.5 dB lower than that of an identical overall dimensions RA in a 7 % operating frequency band. The operating frequency band of the reflectarray in 1 dB gain zone was 11 %.

Conclusion. On the basis of a Maltese cross microstrip element, it is possible to implement a single-layer reflectarray with a more than 10 % frequency band. The developed prototype showed the possibility of creating highly efficient foldable reflectarrays for operation in satellite communication and television terminals.

Keywords: reflectarray, Floquet cell, microstrip element

For citation: Polenga S. V., Ryazantsev R. O., Poligina A. D., Krylov R. M., Litinskaya E. A., Salomatov Yu. P. A Ku-Band Foldable Reflectarray Based on a Maltese-Cross Microstrip Element. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 37–47. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-37-47

Conflict of interest. Authors declare no conflicts of interest.

Financing source. The research was funded by RFBR, Krasnoyarsk Territory and Krasnoyarsk Regional Fund of Science, project number 20-47-240003.

Submitted 10.06.2021; accepted 08.07.2021; published online 25.09.2021

Введение. Отражательные антенные решетки (ОАР) обладают рядом преимуществ перед традиционно используемыми в спутниковой связи зеркальными антеннами (ЗА). ОАР могут быть совмещены с конструктивными элементами различных объектов, таких, как стены зданий, рекламные баннеры [1], солнечные батареи телекоммуникационных спутников [2, 3]. ОАР могут иметь плоскую форму, что значительно облегчает создание разборных и сворачиваемых конструкций [4]. Плоская форма решетки позволяет изготавливать антенны методами фотолитографии [1, 4], лазерной резки [5] и 3D-печати [6, 7]. Возможность независимой установки фазы на каждом из элементов решетки позволяет использовать методы фазового синтеза и создавать ОАР

с диаграммами направленности специальной формы [8, 9].

Несмотря на ряд преимуществ, ОАР имеют главный недостаток – узкую полосу рабочих частот [10–12]. Существует несколько основных факторов, ограничивающих диапазон рабочих частот: фиксированная фазовая настройка элементов в составе решетки, зонирование, ограниченная полоса рабочих частот элементов, ограниченный диапазон регулировки их фазы. Простые однослойные микрополосковые элементы (МЭ) не позволяют добиться диапазона регулировки фазы переизлученной волны, равного 360°; как правило, диапазон регулировки ограничивается 300…320° в зависимости от толщины подложки. Использование многослойных элементов позволяет значительно расширить диапазон регулировки и сделать фазовую кривую более пологой [13], что снижает влияние погрешностей при производстве топологии ОАР на характеристики антенной системы. Однако использование в составе ОАР многослойных элементов [14, 15] значительно увеличивает сложность антенной системы, а соответственно, и ее стоимость. При использовании двухслойной конфигурации вдвое возрастают затраты на диэлектрическую подложку и на изготовление топологии. Таким образом, актуальным является поиск элементов ОАР, обеспечивающих диапазон регулировки более 360° и малую крутизну фазовой характеристики во всем диапазоне фазовой регулировки.

Элемент отражательной антенной решетки. Для разработки ОАР использован элемент в виде креста с расширяющимися гранями (рис. 1). Расчет элемента производился методом ячейки Флоке [16], который позволяет учесть взаимосвязь элементов

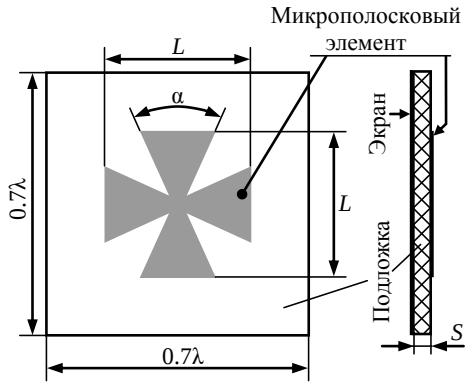


Рис. 1. Элемент ОАР на основе резонатора в форме мальтийского креста

Fig. 1. Reflectarray element based on a Maltese cross shaped resonator

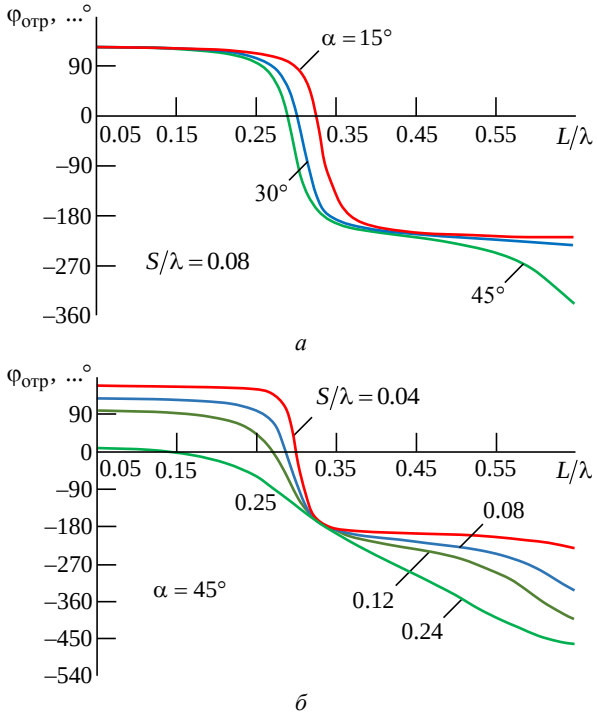


Рис. 2. Зависимость фазы отраженной волны от размера элемента при различных углах расширения луча α (*а*); при различной толщине подложки для α = 45° (*б*)

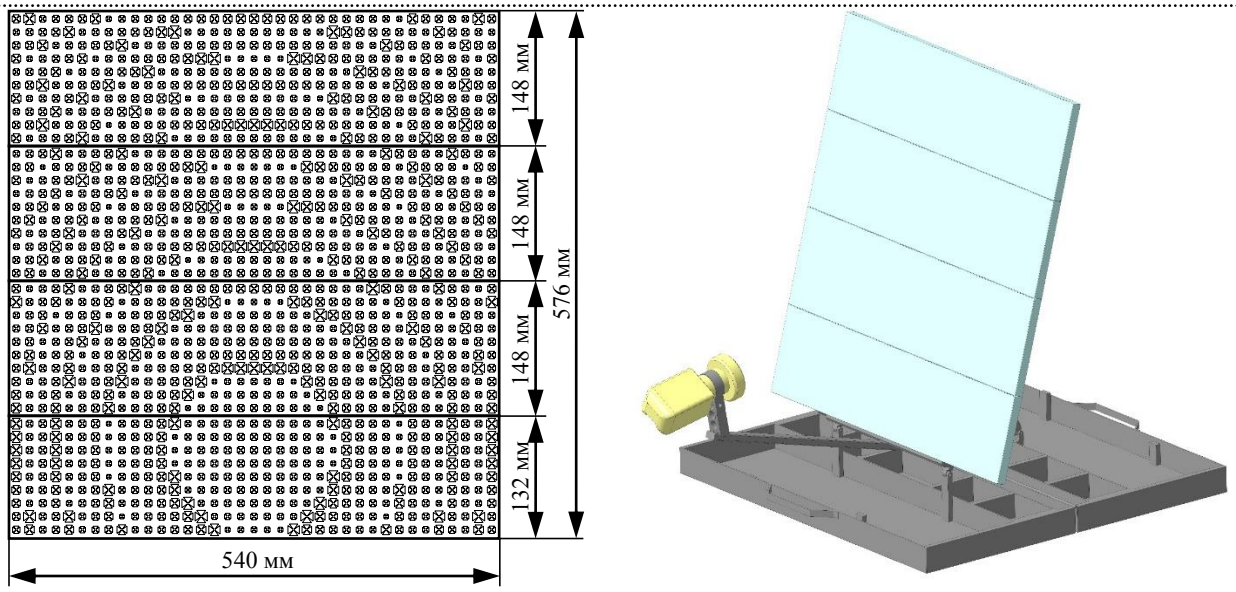
Fig. 2. Dependence of the phase of the reflected wave on the L: *a* – for different angles of beam expansion; *б* – for different substrates thicknesses at α = 45°

в составе решетки. Возбуждение элемента предусмотрено одним портом.

В качестве материала подложки выбран вспененный полиэтилен с эффективной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 1.05$. В связи с малой плотностью материала потери в нем пренебрежимо малы. Топология элемента описывается двумя параметрами: длиной креста L и углом расширения его луча α. Проводящий слой МЭ и экран имеют толщину 35 мкм.

На рис. 2, *а* показана зависимость фазы отраженной волны $\varphi_{отр}$ от длины стороны элемента при толщине подложки $S/\lambda = 0.08$ (λ – длина волны на центральной частоте). При $\alpha \le 30°$ характеристика предложенного элемента совпадает с характеристикой обычного крестообразного элемента [17]. По мере увеличения угла α до 45° возможности регулировки фазы отраженной волны расширяются за счет появления ее зависимости от размера элемента при $L > 0.5\lambda$.

На рис. 2, *б* показаны фазовые зависимости для четырех значений толщины подложки при $\alpha = 45°$. Диапазон регулировки фазы достигает 500° при $S/\lambda = 0.12$. В таком случае может быть



а *б*

Рис. 3. Разборная отражательная антенная решетка: *а* – топология; *б* – конструкция ОАР

Fig. 3. Foldable reflectarray: *а* – topology; *б* – reflectarray design

выбран удобный, наиболее линейный участок кривой для построения ОАР. Шаг решетки может быть уменьшен до 0.55λ с сохранением диапазона регулировки равным 360°. Дальнейшее увеличение толщины подложки повышает линейность регулировочной кривой практически во всем диапазоне регулировки фазы. Таким образом, на основе представленного элемента может быть разработана однослойная ОАР без ошибок в фазовом распределении на центральной частоте, вызванных ограниченным диапазоном фазовой регулировки.

Разработка отражательной антенной решетки. На основе рассмотренного элемента была синтезирована топология ОАР (рис. 3, *а*). Решетка содержит 37 × 39 элементов, расположенных с шагом 14.5 мм (0.6λ). Для преобразования сферического фазового фронта волны облучателя в плоский фазовый фронт антенной системы в составе ОАР предусмотрены МЭ трех размеров, формирующие отраженную волну с различными фазами, расположенные в необходимой конфигурации[1].

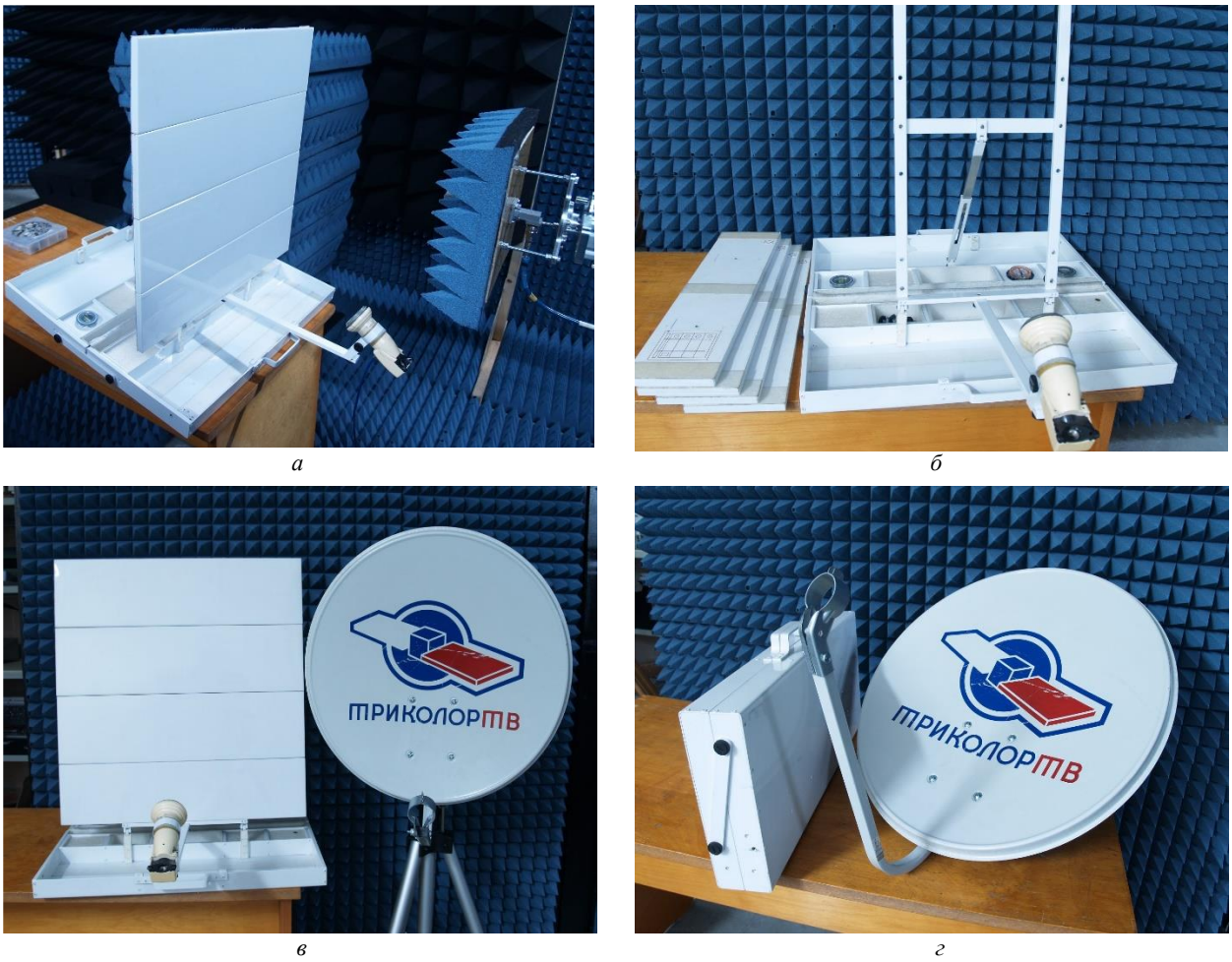
Для формирования складной конструкции ОАР разбита на 4 подрешетки (рис. 3). Нижняя по топологии подрешетка (рис. 3, *а*) имеет уменьшенный вертикальный размер и на один ряд меньше МЭ. В силу технологических ограничений расстояние между крайними рядами МЭ подрешеток увеличено на 2.5 мм.

Для ликвидации затенения решетки облучателем выбран угол подъема луча 12° относительно перпендикуляра к плоскости решетки (рис. 3, *б*). Конфигурация питания офсетная.

Фокусное расстояние составило 300 мм, размеры ОАР 540 × 576 мм. Габаритные размеры решетки выбраны близкими к габаритным размерам ЗА "Супрал СТВ-0.55" (560 × 600 мм), используемой в сетях спутникового телевидения, с целью дальнейшего сравнительного анализа характеристик антенных систем.

Изготовление макета отражательной антенной решетки. Макет ОАР представлен на рис. 4, *а*. В основании подрешеток использован листовой вспененный поливинилхлорид толщиной 10 мм. Печатная плата с элементами ОАР изготовлена из фольгированного лавсана толщиной 0.15 мм методом фотолитографии. Подложка выполнена из вспененного полиэтилена. Монтаж слоев основания, экрана, подложки и печатной платы с элементами ОАР между собой производился с использованием двухсторонней клейкой ленты. Для защиты от внешних воздействий подрешетки ОАР закрыты обтекателем, изготовленным из листового полиэтилентерефталата толщиной 1 мм. В сложенном состоянии антенна представляет собой кейс размерами 590 × 280 × 83 мм (рис. 4, *б*, *г*), внутри которого размещаются все

[1] В ЗА, с характеристиками которой сопоставляются характеристики разработанной ОАР, преобразование фазового фронта достигается за счет разности длин хода лучей.



а *б* *в* *г*

Рис. 4. Исследуемые антенные системы: *а* – ОАР в процессе измерений; *б* – ОАР в частично разобранном состоянии; *в* – ЗА и ОАР в развернутом состоянии; *г* – ЗА и ОАР в сложенном состоянии

Fig. 4. Antenna systems under study: *а* – reflectarray on the measurements; *б* – reflectarray in a partially disassembled state; *в* – reflector antenna and reflectarray in the unfolded state; *г* – reflector antenna and reflectarray in the folded state

элементы конструкции при транспортировке. В развернутом состоянии кейс является основанием ОАР. Конструкцией предусмотрена регулировка антенны по углу места.

На рис. 4, *в*, *г* для сравнения представлены фотографии разработанной ОАР с ЗА в развернутом и сложенном состояниях. В свернутом состоянии ОАР занимает небольшой объем и более удобна для транспортировки. Все элементы конструкции защищены от внешних воздействий алюминиевым кейсом.

Результаты экспериментальных исследований. Направленные характеристики антенн измерялись методом сканирования амплитудно-фазового распределения в ближнем поле антенны (рис. 4, *а*) с последующим пересчетом характеристик в дальнюю зону.

Коэффициент усиления (КУ) *G* измерялся методом эталонной антенны, в качестве которой использована антенна П6-128 [2] с пределами допускаемой погрешности измерения КУ ±1.5 дБ.

В качестве облучателя использован гофрированный рупор Ku-диапазона частот с установленными коаксиальными разъемами. Коэффициент стоячей волны облучателя составляет не более двух во всем исследуемом диапазоне частот. В целях сравнительного анализа измерены характеристики ЗА с использованием этого же облучателя.

Измеренные диаграммы направленности представлены на рис. 5.

Во всех случаях уровень боковых лепестков (УБЛ) ОАР оказался выше, чем у ЗА. Это связано с тем, что площадь поверхности, отражающей периферийное излучение облучателя, у ОАР

[2] Антенна измерительная рупорная широкополосная П6-128. Паспорт КНПР.464663.002 ПС / ЗАО "СКАРД-Электроникс". 2014. 14 с.

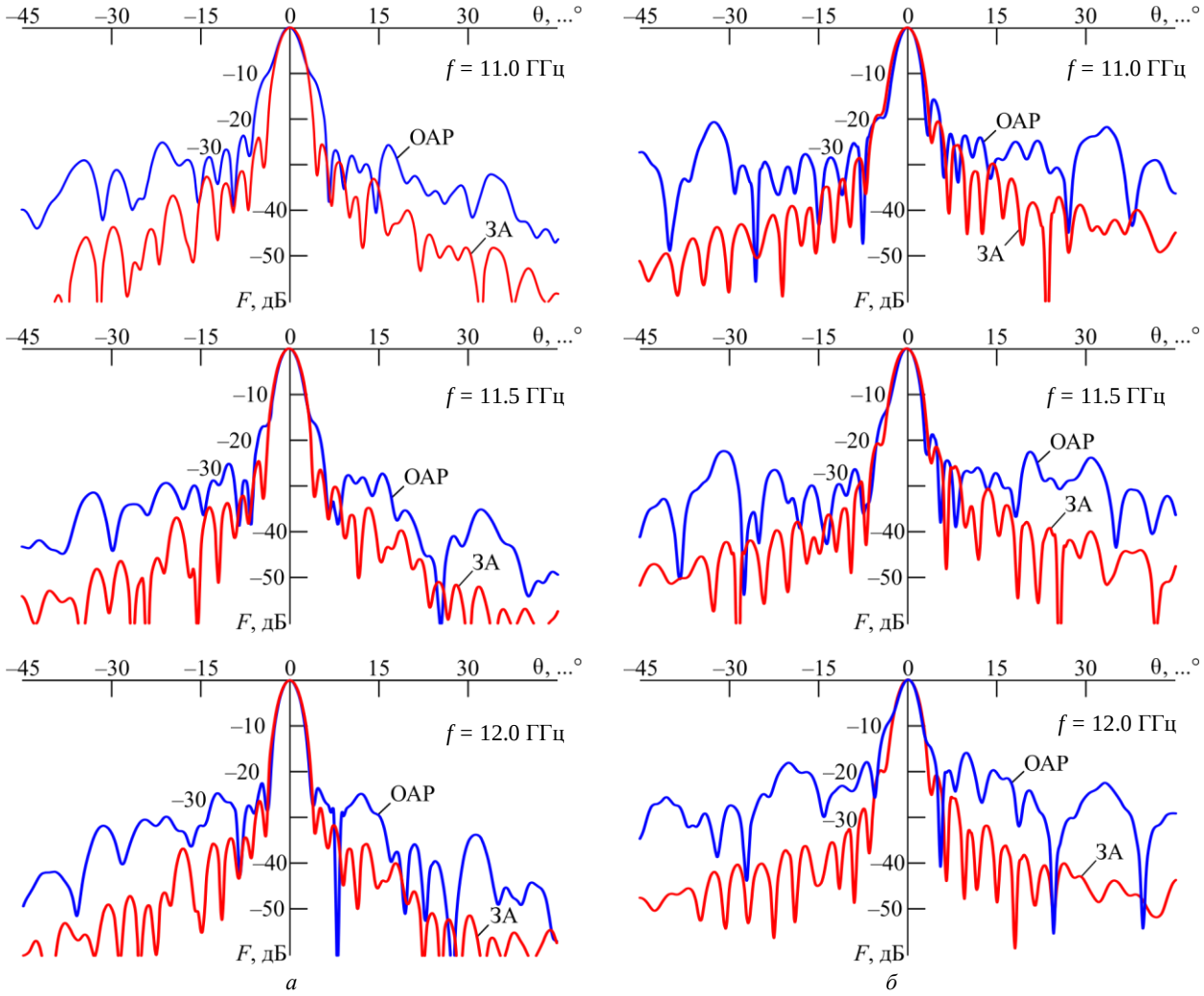


Рис. 5. Диаграммы направленности ОАР и ЗА: *а* – азимутальное сечение; *б* – угломестное сечение. Результаты измерений

Fig. 5. Radiation patterns of reflectarray and parabolic reflector antenna: *а* – azimuth section; *б* – elevation section. Measurement results

больше, чем у ЗА, за счет прямоугольной формы. Помимо этого, коррекция фазового распределения в ОАР выполняется дискретно, а не непрерывно, как это происходит в ЗА. За счет более равномерного амплитудного распределения ОАР обладает более узкими диаграммами направленности в рабочей полосе частот, чем ЗА.

Частотные зависимости ширины диаграммы направленности (ШДН) W по уровню –3 дБ и уровня максимального бокового лепестка U приведены на рис. 6, *в*, *б* соответственно. В рабочей полосе частот уровень максимального бокового лепестка ОАР не превышает –15 дБ в угломестной и –20 дБ в азимутальных плоскостях. За пределами рабочей полосы частот наблюдается повышение бокового излучения.

ШДН ЗА в двух плоскостях отличаются незначительно. Это связано с тем, что эффективная апертура в направлении излучения близка к окружности. Напротив, эффективный размер апертуры ОАР в угломестной плоскости больше, чем в азимутальной, за счет чего наблюдается дополнительное сужение ШДН.

Измеренные значения коэффициента направленного действия (КНД) и КУ ЗА отличаются в среднем на 1.6 дБ (рис. 6, *а*) в исследуемом диапазоне частот (10.7…12 ГГц). В этих значениях учитываются потери в материалах антенн, потери на рассогласование облучателя, погрешности метода измерения и погрешности эталонной антенны. Указанные погрешности можно считать одинаковыми для обеих антенн, поскольку в исследованиях использовался один и тот же облучатель и одна и та же измерительная установка. Потери в рефлекторе ЗА методом электродинамического моделирования оценены в 0.1 дБ. На основании

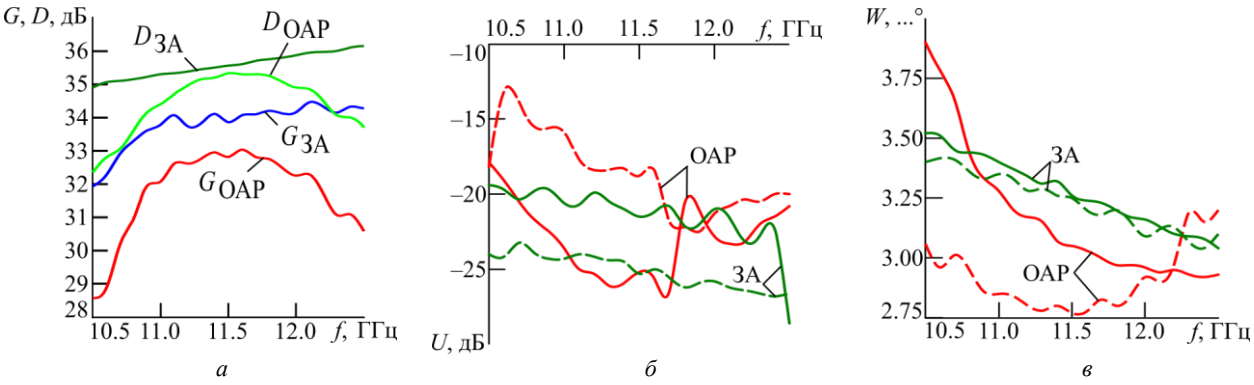


Рис. 6. Измеренные характеристики ОАР и ЗА: *а* – КУ и КНД; *б* – УБЛ; *в* – ШДН. Сплошные линии – азимутальное сечение; штриховые линии – угломестное сечение

Fig. 6. Measured characteristics of reflectarray and parabolic reflector antenna: *a* – gain and directivity; *б* – sidelobe level; *в* – beamwidth. Solid lines – azimuth section; dashed lines – elevation section

полученных данных (рис. 6, *а*) могут быть оценены потери в диэлектрических и проводящих слоях ОАР. Отличие КУ от КНД ОАР в среднем составляет 2.4 дБ. Таким образом, потери в ОАР составляют около 0.9 дБ, или на 0.8 дБ больше, чем в ЗА. Минимальное различие КНД ОАР и ЗА наблюдается на частоте 11.5 ГГц и составляет 0.23 дБ, что свидетельствует о высоком апертурном коэффициенте использования поверхности ОАР на центральной частоте. Фактическая площадь ОАР больше площади ЗА за счет прямоугольной формы рефлектора, однако углы решетки облучаются с меньшей амплитудой и их вклад в КУ минимален. Полоса рабочих ОАР-частот по уровню снижения КУ в 1 дБ составляет 11 %.

Помимо измерений в безэховой камере производились испытания антенны на реальном спутниковом сигнале в сети спутникового телевидения. Разница в уровнях принимаемого сигнала ОАР и ЗА коррелирует с результатами, полученными в рамках лабораторных измерений. ОАР продемонстрировала уверенный прием радиосигналов с геостационарного спутника.

Заключение. Результаты исследования демонстрируют возможность создания ОАР для работы в сетях спутниковой связи. Использование однослойного МЭ в виде мальтийского креста позволило реализовать ОАР с полосой рабочих частот 11 % по уровню КУ –1 дБ от максимального. ОАР демонстрирует высокую эффективность, сравнимую с эффективностью ЗА. Плоская форма ОАР позволяет компактно сворачивать конструкцию, что актуально не только для мобильных терминалов, но и для транспортировки антенн с большой апертурой в регионы с затрудненной транспортной доступностью.

Авторский вклад

Поленга Станислав Владимирович – расчет элементов, синтез топологии ОАР, экспериментальные исследования ОАР.

Рязанцев Роман Олегович – изготовление топологии ОАР, натурные испытания макета ОАР.

Полигина Анастасия Дмитриевна – моделирование элементов ОАР, обработка теоретических данных.

Крылов Роман Михайлович – разработка и изготовление конструкции ОАР.

Литинская Елена Алексеевна – моделирование ОАР, обработка экспериментальных данных.

Саломатов Юрий Петрович – общее руководство проектом.

Author's contribution

Stanislav V. Polenga, calculation of elements, synthesis of reflectarray topology, experimental studies of reflectarray.

Roman O. Ryazantsev, production of the reflectarray topology, full-scale tests of the reflectarray layout.

Anastasya D. Poligina, modeling of reflectarray elements, processing of theoretical data.

Roman M. Krylov, development of the UAR design, manufacture of the UAR.

Elena A. Litinskaya, reflectarray modeling, experimental data processing.

Yuri P. Salomatov, general project management.

Список литературы

1. A Ku-band foldable reflectarray / S. V. Polenga, A. V. Stankovsky, Y. A. Litinskaya, R. M. Krylov, A. M. Alexandrin, Y. P. Salomatov // XIV Intern. Scientific-Technical Conf. on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russia, 2–6 Oct. 2018. Piscataway: IEEE, 2018. Acc. № 18303692. doi: 10.1109/APEIE.2018.8545456

2. Chen Y. S., Wu Y. H., Chung C. C. Solar–powered active integrated antennas backed by a transparent reflectarray for cubesat applications // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 137934–137946. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3012133

3. A Ka–band high–efficiency transparent reflectarray antenna integrated with solar cells / W. An, L. Xiong, S. Xu, F. Yang, H. Fu, J. Ma // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 60843–60851. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2875359

4. Отражательная антенная решетка для сетей дуплексной спутниковой связи технологии VSAT / С. В. Поленга, Е. А. Литинская, Ю. П. Саломатов, Р. М. Крылов // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 9. С. 39–42.

5. Ballandovich S. V., Liubina L. M., Sugak M. I. Investigation of slot reflectarray antennas // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Moscow, Russia, 14–16 March 2018. Piscataway: IEEE, 2018. Acc. № 17715494. doi: 10.1109/MWENT.2018.8337282

6. 3D printed reflectarray antenna at 60 GHz / B. Chen, H. Yi, K. B. Ng, S. Qu, C. H. Chan // Intern. Symp. on Antennas and Propagation (ISAP), Okinawa, Japan, 24–28 Oct. 2016. Piscataway: IEEE, 2016. Acc. № 16602081.

7. Wideband 3D–printed reflectarray of closed–volume elements / Y. Antonov, S. Ballandovich, G. Kostikov, L. Liubina, M. Sugak // 10th Intern. Congress on ultra modern telecommunications and control systems and workshops (ICUMT), Moscow, Russia, 5–9 Nov. 2018. Piscataway: IEEE, 2018. Acc. № 18439590. doi: 10.1109/ICUMT.2018.8631236

8. A Ka–band shaped–beam circularly polarized reflectarray antenna / S. V. Polenga, A. A. Erokhin, R. M. Krylov, A. V. Stankovsky, Y. A. Litinskaya, A. D. Hudonogova, I. Y. Danilov, Yu. P. Salomatov // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia, 24–28 June 2019. Piscataway: IEEE, 2019. Acc. № 18904513. doi: 10.1109/RSEMW.2019.8792697

9. Zhao G., Jiao Y., Zhang F. Broadband design of a shaped beam reflectarray with China coverage pattern // Proc. of the 9th Intern. Symp. on Antennas, Propagation and EM Theory, Guangzhou, China, 29 Nov.– 2 Dec. 2010. Piscataway: IEEE, 2010. Acc. № 11772827. doi: 10.1109/ISAPE.2010.5696447

10. Analysis of multi–faceted reflectarray antenna for spatial bandwidth improvement / V. Patel, P. Mevada, D. Pujara, S. Chakrabarty, M. Mahajan // IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, Montreal, Canada, 5–10 July 2020. Piscataway: IEEE, 2020. Acc. № 20465479. doi: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9329895

11. Impact of feed position on the operating band of broadband reflectarray antenna / M. Mohammadirad, N. Komjani, M. R. Chaharmir, J. Shaker, A. R. Sebak // IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2012. Vol. 11. P. 1104–1107. doi: 10.1109/LAWP.2012.2218563

12. Carrasco E., Encinar J. A., Barba M. Bandwidth improvement in large reflectarrays by using true-time delay // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2008. Vol. 56, № 8. P. 2496–2503. doi: 10.1109/TAP.2008.927559

13. Encinar J. A. Design of two-layer printed reflectarrays using patches of variable size // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2001. Vol. 49, № 10. P. 1403–1410. doi: 10.1109/8.954929

14. ANN characterization of multi-layer reflectarray elements for contoured-beam space antennas in the Ku-band / P. Robustillo, J. Zapata, J. A. Encinar, J. Rubio // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2012. Vol. 60, № 7. P. 3205–3214. doi: 10.1109/TAP.2012.2196941

15. Study on three-layer refelectarray microstrip patches with polarisation transform / H.–H. Chen, W.–X. Zhang, Z.–H. Wu, H.–L. Sun // First Europ. Conf. on Antennas and Propagation, Nice, France, 6–10 Nov. 2006. Piscataway: IEEE, 2018. Acc. № 10152828. doi: 10.1109 /EUCAP. 2006.4584622

16. Capacitive loading effect of dual element reconfigurable reflectarray unit cell / M. A. Daud, N. Misran, M. F. Mansor, M. Y. Ismail // IEEE 14th Malaysia Intern. Conf. on Communication (MICC), Selangor, Malaysia, 2–4 Dec. 2019. Piscataway: IEEE, 2019. Acc. № 19471408. doi: 10.1109/MICC48337.2019. 9037584

17. A design of a broadband single layer polarization beam splitting reflectarray using varying-sized cross dipoles / S. Yu, H. Zhang, S. Liu, B. Bian // Progress In Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS), St Petersburg, Russia, 22–25 May 2017. Piscataway: IEEE, 2017. Acc. № 17521116. doi: 10.1109/PIERS.2017.8261835

Информация об авторах

Поленга Станислав Владимирович – магистр по направлению "Радиотехника" (2009), старший преподаватель кафедры радиотехники Сибирского федерального университета (СФУ). Автор 50 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства, отражательные антенные решетки, квазиоптические антенны, метаматериалы.
Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия
E-mail: twinlive@gmail.com
https://orcid.org/0000–0002–1375–2629

Рязанцев Роман Олегович – кандидат технических наук (2019), доцент кафедры радиотехники СФУ. Автор 28 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства, метаматериалы, квазиоптические антенны.
Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия
E-mail: rryazantsev@sfu–kras.ru
https://orcid.org/0000–0003–1747–0917

Полигина Анастасия Дмитриевна – магистр по направлению "Радиотехника" (2021). Автор четырех научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства, фазированные антенные решетки.
Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия
E-mail: anastasia0711@mail.ru
https://orcid.org/0000–0001–5810–7626

Крылов Роман Михайлович – инженер по специальности "Конструирование и проектирование РЭА" (2009, СФУ), инженер кафедры радиотехники СФУ. Автор 10 научных работ. Сфера научных интересов – конструирование и проектирование РЭА, антенны и СВЧ-устройства.
Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия
E-mail: krulow_roman@mail.ru
https://orcid.org/0000–0002–0899–8595

Литинская Елена Алексеевна – магистр по направлению "Радиотехника" (2011), аспирант, старший преподаватель кафедры радиотехники СФУ. Автор 29 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства, спутниковая связь, сканирующие антенны.
Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия
E-mail: ylitinskaya@gmail.com
https://orcid.org/0000–0002–4442–8047

Саломатов Юрий Петрович – кандидат технических наук (1982), профессор (2013) кафедры радиотехники СФУ. Автор 240 научных работ. Сфера научных интересов – ФАР, ЦФАР, квазиоптические антенны.
Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия
E-mail: ysalomatov@sfu–kras.ru
https://orcid.org/0000–0003–4309–226X

References

1. Polenga S. V., Stankovsky A. V., Litinskaya Y. A., Krylov R. M., Alexandrin A. M., Salomatov Y. P. A Ku-band foldable reflectarray. XIV Intern. Scientific-Technical Conf. on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). Novosibirsk, Russia, 2–6 Oct. 2018. Piscataway, IEEE, 2018, acc. no. 18303692. doi: 10.1109/APEIE.2018.8545456

2. Chen Y. S., Wu Y. H., Chung C. C. Solar–powered active integrated antennas backed by a transparent reflectarray for cubesat applications. IEEE Access. 2020, vol. 8, pp. 137934–137946. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3012133

3. An W., Xiong L., Xu S., Yang F., Fu H., Ma J. A Ka-band high–efficiency transparent reflectarray antenna integrated with solar cells. IEEE Access. 2018, vol. 6, pp. 60843–60851. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2875359

4. Polenga S. V., Litinskaya Y. A., Salomatov Y. P., Krylov R. M. Reflectarray antenna for bidirectional VSAT satellite communication networks. Achievements of modern radioelectronics. 2012, no. 9, pp. 39–42.

5. Ballandovich S. V., Liubina L. M., Sugak M. I. Investigation of slot reflectarray antennas. Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Moscow, Russia, 14–16 March 2018. Piscataway, IEEE, 2018, acc. no. 17715494. doi: 10.1109/MWENT.2018.8337282

6. Chen B., Yi H., Ng K. B., Qu S., Chan C. H. 3D printed reflectarray antenna at 60 GHz. Intern. Symp. on Antennas and Propagation (ISAP). Okinawa, Japan, 24–28 Oct. 2016. Piscataway, IEEE, 2016, acc. no. 16602081.

7. Antonov Y., Ballandovich S., Kostikov G., Liubina L., Sugak M. Wideband 3D–printed reflectarray of closed–vol-

ume elements. 10th Intern. Congress on ultra modern telecommunications and control systems and workshops (ICUMT). Moscow, Russia, 5–9 Nov. 2018. Piscataway, IEEE, 2018, acc. no. 18439590. doi: 10.1109/ICUMT.2018.8631236

8. Polenga S. V., Erokhin A. A., Krylov R. M., Stankovsky A. V., Litinskaya Y. A., Hudonogova A. D., Danilov I. Y., Salomatov Yu. P. A Ka–band shaped–beam circularly polarized reflectarray antenna. Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Divnomorskoe, Russia, 24–28 June 2019. Piscataway, IEEE, 2019, acc. no. 18904513. doi: 10.1109/RSEMW.2019.8792697

9. Zhao G., Jiao Y., Zhang F. Broadband design of a shaped beam reflectarray with China coverage pattern. Proc. of the 9th Intern. Symp. on Antennas, Propagation and EM Theory. Guangzhou, China, 29 Nov. – 2 Dec. 2010. Piscataway, IEEE, 2010, acc. no. 11772827. doi: 10.1109/ISAPE.2010.5696447

10. Patel V., Mevada P., Pujara D., Chakrabarty S., Mahajan M. Analysis of multi–faceted reflectarray antenna for spatial bandwidth improvement. IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting. Montreal, Canada, 5–10 July 2020. Piscataway, IEEE, 2020, acc. no. 20465479. doi: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9329895

11. Mohammadirad M., Komjani N., Chaharmir M. R., Shaker J., Sebak A. R. Impact of feed position on the operating band of broadband reflectarray antenna. IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2012, vol. 11, pp. 1104–1107. doi: 10.1109/LAWP.2012.2218563

12. Carrasco E., Encinar J. A., Barba M. Bandwidth improvement in large reflectarrays by using true-time delay. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2008, vol. 56, no. 8, pp. 2496–2503. doi: 10.1109/TAP.2008.927559

13. Encinar J. A. Design of two-layer printed reflectarrays using patches of variable size. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2001, vol. 49, no. 10, pp. 1403–1410. doi: 10.1109/8.954929

14. Robustillo P., Zapata J., Encinar J. A., Rubio J. ANN characterization of multi-layer reflectarray elements for contoured-beam space antennas in the Ku-band. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2012, vol. 60, no. 7, pp. 3205–3214. doi: 10.1109/TAP.2012.2196941

15. Chen H.–H., Zhang W.–X., Wu Z.–H., Sun H.–L. Study on three-layer refelectarray microstrip patches with polarisation transform. First Europ. Conf. on Antennas and Propagation. Nice, France, 6–10 Nov. 2006. Piscataway, IEEE, 2018, acc. no. 10152828. doi: 10.1109/EUCAP. 2006.4584622

16. Daud M. A., Misran N., Mansor M. F., Ismail M. Y. Capacitive loading effect of dual element reconfigurable reflectarray unit cell. IEEE 14th Malaysia Intern. Conf. on Communication (MICC). Selangor, Malaysia, 2–4 Dec. 2019. Piscataway, IEEE, 2019, acc. no. 19471408. doi: 10.1109/MICC48337.2019.9037584

17. S. Yu, H. Zhang, S. Liu, B. Bian A design of a broadband single layer polarization beam splitting reflectarray using varying-sized cross dipoles./ Progress In Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS). St Petersburg, Russia, 22–25 May 2017. Piscataway, IEEE, 2017, acc. no. 17521116. doi: 10.1109/PIERS.2017.8261835

Information about the authors

Stanislav V. Polenga, Master's degree in Radio Engineering (2009), senior lecturer of the Department of Radio Engineering of the Siberian Federal University (SFU). The author of 50 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices, reflectarrays, quasi-optical antennas, metamaterials.
Address: Siberian Federal University, 79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia
E-mail: twinlive@gmail.com
https://orcid.org/0000–0002–1375–2629

Roman O. Ryazantsev, Cand. Sci. (Eng.) (2019), associate professor of Department of Radio Engineering of the SFU. The author of 28 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices, metamaterials, quasi-optical antennas and antenna arrays.
Address: Siberian Federal University, 79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia
E-mail: rryazantsev@sfu–kras.ru
https://orcid.org/0000–0003–1747–0917

Anastasia D. Poligina, Master's degree in Radio Engineering (2021). The author of 4 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices, phased arrays.
Address: Siberian Federal University, 79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia
E-mail: anastasia0711@mail.ru
https://orcid.org/0000–0001–5810–7626

Roman M. Krylov, engineer on Design and Engineering of Electronic Equipment (2009, SFU), engineer of the Department of Radio Engineering of the SFU. Author of 10 scientific papers. Area of expertise: design of electronic equipment, antennas and microwave devices.
Address: Siberian Federal University, 79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia
E-mail: krulow_roman@mail.ru
https://orcid.org/0000–0002–0899–8595

Elena A. Litinskaya, Master's degree in Radio Engineering (2011), postgraduate student, senior lecturer of the Department of Radio Engineering of the SFU. The author of 29 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices, satellite communication, scanning antennas.
Address: Siberian Federal University, 79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia
E-mail: ylitinskaya@gmail.com
https://orcid.org/0000–0002–4442–8047

Yury P. Salomatov, Cand. Sci. (Eng.) (1982), Professor (2013) of the Department of Radio Engineering of the SFU. The author of 240 scientific publications. Area of expertise: phased arrays, digital phased arrays, quasi-optical antennas.
Address: Siberian Federal University, 79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia
E-mail: ysalomatov@sfu–kras.ru
https://orcid.org/0000–0003–4309–226X

Конференции, форумы, семинары

Всероссийская научно-техническая конференция «Антенны и распространение радиоволн»

24–26 ноября 2021 года
Россия, Санкт-Петербург

Всероссийская научно-техническая конференция «Антенны и распространение радиоволн 2021» (APP'21) проводится 24–26 ноября 2021 г. в рамках Санкт-Петербургской антенной недели 2021 совместно с Международной конференцией «Antenna Design and Measurement International Conference 2021» (ADMInC'21) в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»). Мероприятие предоставляет специалистам в области антенной техники, электродинамики, измерений антенных систем и распространения радиоволн широкие возможности для представления новых научных результатов, обмена опытом и установления деловых контактов.

Труды конференции на русском языке будут опубликованы в электронном виде и распространены в день открытия конференции.

Доклады размещаются в коллекции Научной электронной библиотеки e-library.ru и индексируются библиографической базой данных научных публикаций российских ученых РИНЦ.

Планируется поддержка Международного института инженеров электротехники и электроники IEEE (англ. Institute of Electrical and Electronic Engineers). По итогам рецензирования англоязычные доклады, подготовленные авторами – членами IEEE, будут переданы для размещения в электронную библиотеку IEEE Xplore для последующей индексации Scopus.

Antenna Design and Measurement International Conference 2021 (ADMInC'21) is held on Nov. 24–26, 2021 as part of the St Petersburg Antenna Week 2021 together with the All-Russian Scientific and Technical Conference "Antennas and Radio Wave Propagation 2021" (APP'21) in St Petersburg Electrotechnical University (ETU). The event provides ample opportunities to present new scientific results, exchange experience and establish business contacts to researchers in the field of antenna technology, electromagnetics, antenna measurements and wave propagation.

The Conference Proceedings will be published digitally.

The Conference Proceedings will be submitted for inclusion into the IEEE Xplore Digital Library.

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 48–56
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 48–56

Радиолокация и радионавигация

УДК 621.396.06 Оригинальная статья

https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-4-48-56

Усечение падающего поля в задаче рассеяния электромагнитных волн на случайных поверхностях конечной длины

В. В. Леонтьев, М. А. Бородин✉

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

✉ boroda84@gmail.com

Аннотация

Введение. При анализе рассеяния радиоволн на случайных поверхностях часто используют интегральные уравнения, решаемые численными методами, работоспособными лишь при ограничении размеров поверхности. Указанное ограничение приводит к появлению краевых токов, которые, в свою очередь, вызывают существенные ошибки в расчетах эффективной площади рассеяния (ЭПР), особенно при скользящих углах облучения. Для снижения влияния краевых токов обычно используют функцию усечения падающего поля, которая должна удовлетворять совокупности требований – обеспечивать малое подавление поля по всей площади поверхности конечного размера между ее краями и одновременно снижение амплитуды поля до пренебрежимо малых значений при приближении к этим краям. Падающее поле с используемой функцией усечения должно удовлетворять волновому уравнению с минимальной погрешностью. Известны различные функции усечения падающей волны (гауссовская, Торсоса, интегральная), однако ни одна из них полностью не удовлетворяет предъявляемым требованиям.

Цель работы. Предложить новую функцию усечения амплитуды электромагнитной волны, падающей на возмущенную поверхность ограниченного размера, для расчета ее ЭПР. По сравнению с известными функциями усечения новая функция должна удовлетворять всей совокупности предъявляемых требований.

Материалы и методы. Выполнено сравнение предложенной функции усечения амплитуды падающего поля с известными функциями усечения, в том числе проведена оценка погрешности удовлетворения волновому уравнению. Для доказательства применимости предложенной функции усечения в среде MatLab выполнено математическое моделирование бистатической диаграммы рассеяния двумерной морской поверхности конечной длины с пространственным спектром Эльфохейли методом Монте-Карло.

Результаты. Установлено, что предложенная функция усечения амплитуды падающего поля удовлетворяет предъявляемым требованиям лучше известных функций. Результаты математического моделирования показали, что новая функция обеспечивает приемлемую точность оценки ЭПР случайных поверхностей конечной длины.

Заключение. Получена новая функция усечения амплитуды падающего поля для уменьшения влияния краевых токов на точность оценки ЭПР двумерных случайных поверхностей конечной длины, которая рекомендуется к использованию при решении задачи рассеяния.

Ключевые слова: функция усечения амплитуды падающего поля, эффективная площадь рассеяния, морская поверхность, рассеяние радиоволн, скользящий угол облучения

Для цитирования: Леонтьев В. В., Бородин М. А. Усечение падающего поля в задаче рассеяния электромагнитных волн на случайных поверхностях конечной длины // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 48–56. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-48-56

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 20.04.2021; принята к публикации после рецензирования 25.05.2021; опубликована онлайн 29.09.2021

© Леонтьев В. В., Бородин М. А., 2021

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

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 48–56
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 48–56

Radar and Navigation

Original article

Tapering the Incident Field When Solving Problems of Electromagnetic Wave Scattering Over Finite-Size Random Surfaces

Viktor V. Leont'ev, Mikhail A. Borodin✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ boroda84@gmail.com

Abstract

Introduction. An analysis of radio wave scattering over random surfaces frequently involves integral equations, which are solved by numerical methods. These methods are feasible only provided limited dimensions of the surface. The requirement of surface limitation leads to the appearance of edge currents, resulting in significant errors when calculating the radar cross section (RCS), particularly for grazing incident angles. The influence of edge currents is reduced by a function tapering the incident field amplitude. This function should satisfy the following requirements: to provide a low suppression of the field along the entire finite-size surface between its edges at the same time as decreasing the incident field amplitude to negligible values when approaching the edges. The incident field under the application of the tampering function should satisfy the wave equation with a minimum error. Although various tapering functions are applied for incident field amplitude (i.e. Gaussian, Thorsos, integral), none of them satisfies the aforementioned requirements.

Aim. To suggest a novel function for tapering the amplitude of an electromagnetic wave incident on a perturbed finite-size surface when calculating RCS. In comparison with the known functions, the proposed function must satisfy the entire set of requirements.

Materials and methods. A comparison of the proposed tapering function for incident field amplitude with the known tapering functions was performed, including the estimation of the error of satisfying the wave equation. To prove the applicability of the proposed tapering function, a mathematical modeling of the bistatic scatter diagram of a two-dimensional sea-like finite surface with a spatial Elfouhaily spectrum was carried out using Monte Carlo calculations in the Matlab environment.

Results. Compared to the known tapering functions, the proposed tapering function satisfies the entire set of requirements. The results of mathematical modeling showed that the proposed function for tapering the incident field amplitude provides acceptable accuracy of estimating the RCS of finite-size random surfaces.

Conclusion. A novel function for tapering the incident field amplitude was derived. This function reduces the influence of edge currents on the accuracy of RCS estimation of two-dimensional finite-size random surfaces, thus being instrumental for solving scattering problems.

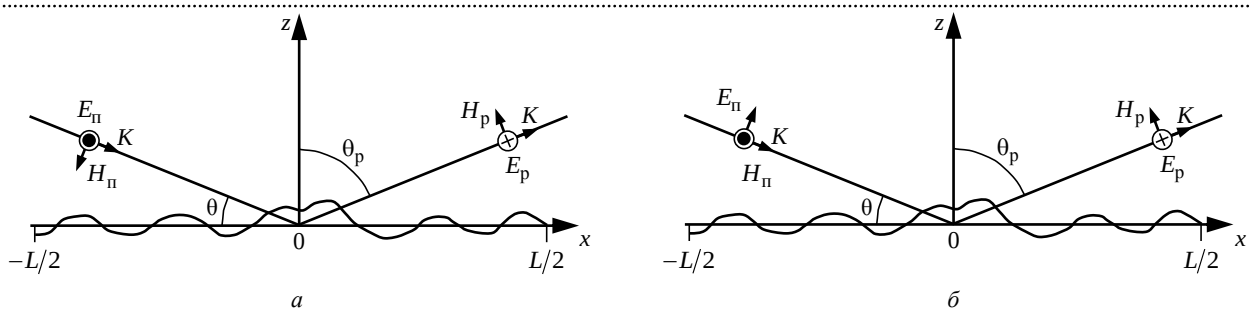
Keywords: tapering function for incident field amplitude, radar cross section, sea surface, radio wave scattering, grazing incident angle

For citation: Leont'ev V. V., Borodin M. A. Tapering the Incident Field When Solving Problems of Electromagnetic Wave Scattering Over Finite-Size Random Surfaces. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 48–56. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-48-56

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

Submitted 20.04.2021; accepted 25.05.2021; published online 29.09.2021

Введение. Одной из основных задач анализа распространения электромагнитных волн является задача их рассеяния на различных поверхностях. Рассмотрим такую задачу в плоскости, проходящей через точки расположения источника излучения и отражения от поверхности, считая последнюю шероховатой, т. е. имеющей различные отклонения z точек поверхности для различных координат поверхности x: $z = z(x)$ (рис. 1). Будем считать поверхность идеально проводящей шероховатой, представляющей собой реализацию случайной морской волны. Начало 0 декартовой прямоугольной системы координат $0xz$ размещено в точке зеркального отражения, имеющей $z = 0$.



а *б*

Рис. 1. Геометрия задачи рассеяния: *а* – при горизонтальной поляризации (ТЕ); *б* – при вертикальной поляризации (ТМ)

Fig. 1. Geometry of scattering problem: *а* – with horizontal polarization (TE); *б* – with vertical polarization (TM)

В эту точку электромагнитная волна падает под углом θ, отражение происходит под углом $\theta_р$. Углы отсчитываются от осей 0*x* и 0*z* соответственно в положительном направлении оси *x* по часовой стрелке. В частном случае зеркального отражения (или рассеяния вперед) $\theta_р \equiv \theta_{отр} = \pi/2 - \theta$. Направление обратного отражения, важное для однопозиционных радиолокационных систем, определит угол $\theta_р = \theta - \pi/2$.

Задачи рассеяния решаются с помощью интегральных уравнений. В случае бесконечной поверхности в качестве падающего поля рассматривают плоскую волну

$$\Psi_п(x, z, t) = \\ = \Psi_0 \exp(-i\omega t)\exp[ik(x\cos\theta - z\sin\theta)], \quad (1)$$

где *x* и *z* – координаты точек поверхности; *t* – время; Ψ_0 – амплитуда; ω – круговая частота; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число (λ – длина электромагнитной волны); θ – угол скольжения. Далее множитель $\exp(-i\omega t)$, учитывающий зависимость поля от времени, опускается.

В рассматриваемом двумерном случае в зависимости от поляризации удобнее работать с напряженностью электрического поля *E* либо с напряженностью магнитного поля *H*. При горизонтальной (ТЕ) поляризации (рис. 1, *а*) выбирают напряженность электрического поля [1] и в (1) $\Psi_п \equiv E_п$, при вертикальной (ТМ) – работают с напряженностью магнитного поля и в (1) $\Psi_п \equiv H_п$ (рис. 1, *б*).

На практике интегральные уравнения приходится решать численными методами, в силу чего любую поверхность необходимо ограничивать. Так, на рис. 1 введено ограничение длины поверхности в пределах $\pm L/2$ относительно начала координат. Ограничение поверхности ведет к появлению краевых токов, которые, в свою очередь, приводят к существенным ошибкам в расчетах эффективной площади рассеяния (ЭПР). Особенно эта проблема актуальна при скользящих углах облучения. Для снижения влияния краевых токов обычно используют усечение падающей волны. Цель усечения – посредством взвешивания функцией усечения обеспечить уменьшение ее амплитуды при приближении к краям поверхности конечного размера до пренебрежимо малых значений, оптимально – до нуля. В этом случае в качестве падающего поля рассматривают волну [1]:

$$\Psi_п(x, z) = \\ = \Psi_0 T(x, z)\exp[ik(x\cos\theta - z\sin\theta)], \quad (2)$$

где $T(x, z)$ – функция усечения.

Из (2) следует, что падающее поле больше не является плоской волной, а его энергия распределена в узком луче, сосредоточенном около среднего угла скольжения θ.

Требования к функции усечения предъявляются не только с учетом изменения амплитуды падающей волны (2) на краях поверхности. Необходимо, чтобы она обеспечивала малое подавление поля по всей длине поверхности между ее краями. Кроме того, поле (2) с используемой функцией усечения должно удовлетворять волновому уравнению (по крайней мере, с малой погрешностью).

Цель настоящей статьи – предложить новую функцию усечения амплитуды электромагнитной волны, падающей на возмущенную поверхность ограниченного размера при расчете ее ЭПР. По сравнению с известными функциями усечения новая функция должна удовлетворять всей совокупности предъявляемых требований.

Первой и часто используемой функцией усечения является гауссовская функция [2–5]:

$$T_Г(x, z) = \exp\left[-\frac{(x + z\operatorname{ctg}\theta)^2}{g^2}\right], \quad (3)$$

где g – параметр, контролирующий ширину луча. Торсос показал [2], что поле (2) с усечением (3) представляет собой грубое приближение решения волнового уравнения Гельмгольца:

$$\left(\nabla^2 + k^2\right)\Psi_{\text{п}}(x,\, z) = 0, \qquad (4)$$

где $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial z^2$ – оператор Лапласа.

В силу того, что поле (2) с усечением (3) является грубой аппроксимацией реального падающего поля, Торсос предложил функцию (3) модернизировать [2]:

$$T_{\text{T}}(x,\, z) = \exp\left[-\frac{\left(x + z\operatorname{ctg}\theta\right)^2}{g^2} - i\frac{k\left(x\cos\theta - z\sin\theta\right)}{\left(kg\sin\theta\right)^2}U(x,\, z)\right], \qquad (5)$$

где $U(x,\, z) = \left[\frac{2\left(x + z\operatorname{ctg}\theta\right)^2}{g^2} - 1\right]$.

Функцию (5) принято называть функцией усечения Торсоса [1]. Из сравнения (3) и (5) следует, что гауссовская функция и функция Торсоса совпадают по амплитуде, а суть усечения Торсоса состоит в коррекции фазового сдвига облучающего поля.

Падающее поле (2) с функцией усечения Торсоса (5) удовлетворяет волновому уравнению (4) более точно, чем поле (2) с гауссовской функцией усечения (3).

Поле (2) с функцией усечения Торсоса (5) является аппроксимацией интегрального представления падающего поля [2]:

$$\Psi_{\text{п}}(x,\, z) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\Delta\theta}\int_{-\pi/2}^{\pi/2}\exp\left[-\frac{\left(\theta_1 - \theta\right)^2}{\left(\Delta\theta\right)^2} + ik\left(x\cos\theta_1 - z\sin\theta_1\right)\right]d\theta_1, \qquad (6)$$

где $\Delta\theta = 2/\left(kg\sin\theta\right)$. Будучи суперпозицией плоских волн, поле (6) удовлетворяет волновому уравнению (4), однако, как будет показано далее, обеспечивает при прочих равных условиях существенно меньшее уменьшение амплитуды на краях, чем усечение (5) Торсоса.

Оценке значения контролирующего ширину луча параметра g для представленных моделей в литературе уделено значительное внимание. Обычно рекомендуют выбирать его из диапазона от $L/10$ до $L/4$ [5].

Сравнив рассмотренные модели при одних и тех же условиях задачи, можно заключить, что ни одна из них полностью не удовлетворяет предъявляемым требованиям. Модель (6) удовлетворяет волновому уравнению, но меньше двух других моделей уменьшает амплитуду падающей волны на краях и сильно уменьшает ее по координате x между краями ("внутри") поверхности. Модель поля с гауссовской функцией усечения очень плохо удовлетворяет волновому уравнению. По сравнению с ней модель с функцией усечения Торсоса удовлетворяет уравнению лучше, вызывает такое же уменьшение амплитуды волны на краях, но сильно уменьшает ее по координате x "внутри" поверхности.

Синтез новой функции усечения. Введем новую функцию усечения, которая будет лучше удовлетворять сформулированным требованиям. Расчет ЭПР морской поверхности базируется на методе Монте-Карло, при котором ее случайные реализации генерируют математическим моделированием. Так как профиль поверхности априори неизвестен, сравнивать функции усечения принято на плоской поверхности (при $z = 0$). В связи с этим сначала запишем выражение для новой функции усечения в зависимости только от координаты x:

$$T_{\text{s}}(x) = \frac{\sin\left(x/g\right)}{x/g}. \qquad (7)$$

Для гарантированного уменьшения амплитуды падающей волны до нуля на краях поверхности примем $g = L/(2\pi)$. Тогда (7) примет следующий вид:

$$T_{\text{s}}(x) = \frac{\sin\left(2\pi x/L\right)}{2\pi x/L} = \operatorname{sinc}\left(2\pi x/L\right). \qquad (8)$$

Рис. 2 иллюстрирует влияние типа модели падающей волны на характер изменения ее амплитуды вдоль координаты x для плоской поверхности $(z = 0)$. Линия *1* соответствует падающему полю (2) с предложенной функцией усечения (8), линия *2* – с функцией усечения Торсоса (5), линия *3* – интегральному представлению (6). Для всех трех моделей поля параметр, контролирующий ширину луча, одинаков и определен как $g = L/(2\pi)$. Значения остальных параметров задачи: $L = 10$ м; $\theta = 2°$; $\lambda = 0.03$ м.

Убывание значений рассмотренных функций усечения (рис. 2) от центра к краям поверхности различно и носит нелинейный характер. Значения предложенной функции усечения (8) в большинстве точек "внутри" рассматриваемой поверхности превышают значения функций усечения (5) и (6).

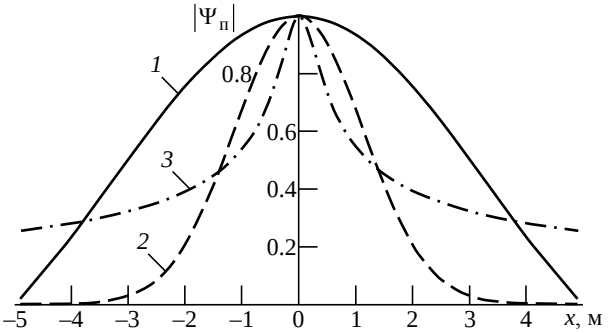


Рис. 2. Модуль падающего поля с функцией усечения:
1 – (8); *2* – (5); *3* – (6)

Fig. 2. Absolute value incident wave of the tapering function:
1 – (8); *2* – (5); *3* – (6)

На краях поверхности при $|x| = 5$ м амплитуда волны принимает следующие значения: для интегрального представления (6) $|\Psi_п| = 0.244$, при функции усечения Торсоса (5) $|\Psi_п| = 5 \cdot 10^{-5}$. Согласно определению (8) значения предложенной функции усечения на краях рассматриваемой поверхности равны нулю, что, в отличие от известных функций, обеспечивает значения $|\Psi_п| = 0$ в этих точках.

Таким образом, по критериям уменьшения амплитуды волны на краях до нуля и меньшего ее подавления "внутри" поверхности функция усечения (8) является наилучшей из рассмотренных.

Попутно отметим, что, хотя волна с функцией усечения Торсоса (5) и хуже, чем волна (6), удовлетворяет волновому уравнению, по сравнению с последней она обеспечивает лучшее подавление амплитуды на краю. По этой причине ранее во многих работах (см., например, [5–9]) в качестве функции усечения использовали функцию Торсоса.

Следует обратить внимание на еще один важный факт. При аппроксимации интегрального представления падающего поля, в результате которой получена функция усечения Торсоса, введен ряд ограничений [1]:

$$g > \frac{(3...4)\sqrt{2}}{k\theta \sin\theta}; \tag{9}$$

$$kg \sin\theta \geq 1; \tag{10}$$

$$|x + z\,\mathrm{ctg}\,\theta| \ll \pi g; \tag{11}$$

$$\frac{|z - x\,\mathrm{ctg}\,\theta|}{g} \ll \frac{kg \sin\theta}{2}. \tag{12}$$

Эти ограничения не позволяют выбирать параметры задачи произвольно. Они устанавливают жесткие связи между параметром g, углом скольжения θ, длиной волны электромагнитного поля λ, параметрами поверхности.

Современные радиолокационные станции (РЛС) имеют высокое разрешение по дальности. В этом случае необходим расчет ЭПР поверхностей малой длины. Особенно актуален такой расчет при разработке алгоритмов обработки сигналов в РЛС, предназначенных для экологического мониторинга морской поверхности с целью обнаружения разливов нефти [10]. Морские судовые навигационные РЛС сантиметрового диапазона длин волн облучают поверхность моря под малыми углами скольжения. Анализ показывает, что для таких РЛС удовлетворить требованиям (9)–(12) сложно, что ограничивает область применения функции усечения Торсоса.

Проверка на удовлетворение волновому уравнению. Проверим представление падающего поля (2) с функцией усечения (8) на соответствие волновому уравнению. Подставив (2) с (8) в (4), получим:

$$\left(\nabla^2 + k^2\right)\Psi_п(x, z) = k^2 \delta_s, \tag{13}$$

где δ_s – некий параметр. Поясним его физический смысл и приведем для него аналитическое выражение. Очевидно, что $k^2 > 0$ и правая часть выражения (13) стремится к нулю только при условии стремления к нулю δ_s. По этой причине параметр δ_s можно назвать погрешностью, с которой волна не удовлетворяет волновому уравнению. Для волны (2) с функцией усечения (8) погрешность определяется следующей формулой:

$$\delta_s = \left|\left(A_1 + iB_1\right)\Psi_п(x, z)\right|, \tag{14}$$

где

$$A_1 = \frac{2}{(xk)^2} - \frac{4\pi^2}{(kL)^2} - \frac{4\pi \cos\left(x/g\right)}{xk^2 L \sin\left(x/g\right)};$$

$$B_1 = \frac{4\pi \cos(\theta)\cos\left(x/g\right)}{kL \sin\left(x/g\right)} - \frac{2\cos(\theta)}{xk}.$$

Аналогичная погрешность для волны (2) с функцией усечения Торсоса (5) имеет вид [4]:

$$\delta_T = \left|\left(A_2 + iB_2\right)\Psi_п(x, z)\right|, \tag{15}$$

где $A_2 = -W^2 - \dfrac{16x^4 \cos^2\theta}{k^4 g^8 \sin^6\theta};$

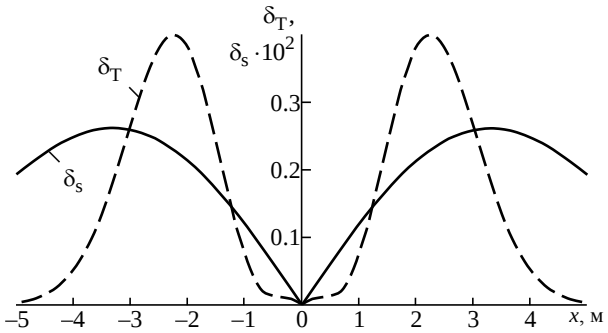


Рис. 3. Оценка погрешности удовлетворения волновому уравнению

Fig. 3. Estimation of the error of satisfying the wave equation

$$B_2 = \frac{4kx\cos\theta}{(kg\sin\theta)^4}\left(1-\frac{4x^2}{g^2}\right);\ W = \frac{2(x/g)^2-1}{(kg\sin\theta)^2}.$$

Сравним погрешности (14) и (15). При этом будем полагать, что параметр, контролирующий ширину луча, для указанных моделей поля одинаков и определяется как $g = L/(2\pi)$. Другие параметры определены так же, как при расчете кривых на рис. 2.

Изменение погрешностей по оси *x* показано на рис. 3. Штриховая линия соответствует погрешности для волны с функцией усечения Торсоса, сплошная – умноженной на 100 погрешности для волны с предложенной функцией усечения (8). Масштабирование второй зависимости выполнено для отображения обеих зависимостей на одном рисунке. Максимальное значение погрешности для волны с функцией усечения Торсоса $\delta_{T\max} = 0.4$, для волны с функцией усечения (8) – $\delta_{s\max} = 0.0026$.

Сравнение показывает, что волна с предложенной функцией усечения (8) удовлетворяет волновому уравнению существенно лучше, чем волна с функцией усечения Торсоса.

Обобщим введенную функцию усечения с учетом координаты *z* поверхности. Каждая реализация поверхности при моделировании случайна, и значения ее ординат на краях априори не известны. В этих условиях функция усечения должна обеспечивать на краях равную нулю амплитуду падающей волны, поэтому приобретает сложный вид:

$$T_s(x,\ z) = \begin{cases} \mathrm{sinc}U_1(x,\ z),\ -L/2 \le x \le 0; \\ \mathrm{sinc}U_2(x,\ z),\ 0 < x \le L/2, \end{cases} \quad (16)$$

где $U_{1,\,2} = \dfrac{x \pm z(x)\mathrm{ctg}\,\theta}{\mp L/2 \pm z(\mp L/2)\mathrm{ctg}\,\theta}$,

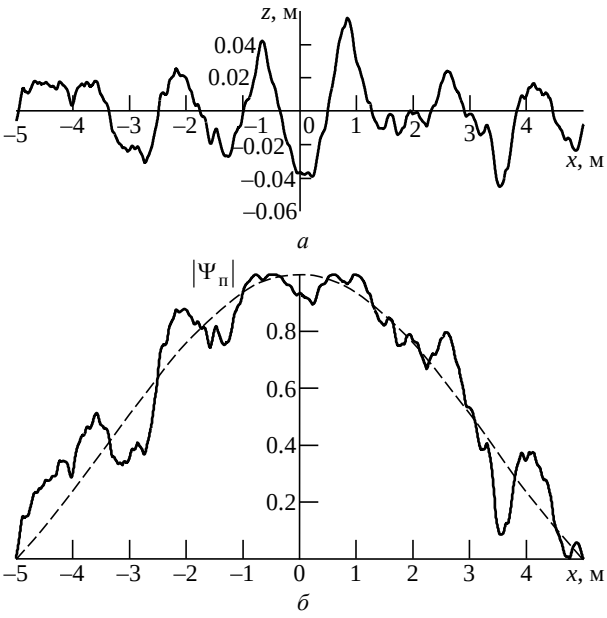


Рис. 4. Реализация морской поверхности (*а*) и функции усечения (*б*)

Fig. 4. Realization of the sea surface (*a*) and tapering function (*б*)

причем $z(\mp L/2)$ – значения функции $z = z(x)$ при $x = \mp L/2$.

На рис. 4, *а* представлена реализация волнового профиля случайной морской волны, полученная с помощью спектральной модели [11–13]. В качестве пространственного спектра моря использован спектр Эльфохейли [14–15], лучше других спектров описывающий как гравитационные, так и гравитационно-капиллярные волны. Моделирование выполнено при следующих значениях параметров: $L = 10$ м; скорость ветра на высоте 19.5 м $v_в = 2$ м/с; среднеквадратическое отклонение ординат волнового профиля $\sigma_z = 0.02$ м.

На рис. 4, *б* сплошной линией изображена реализация функции усечения (16), соответствующая реализации волнового профиля морской волны, представленной на рис. 4, *а*. Штриховой линии на рис. 4, *б* соответствует функция усечения (8).

Расчет бистатической диаграммы рассеяния. Определение плотности поверхностного тока (ППТ), наведенного падающим полем (2) с функцией усечения (16), базируется на решении интегрального уравнения для электрического поля (EFIE) [1], [5]. По ППТ вычисляется напряженность электрического поля рассеянной электромагнитной волны и бистатическая диаграмма рассеяния (ДР) – зависимость модуля коэффициента

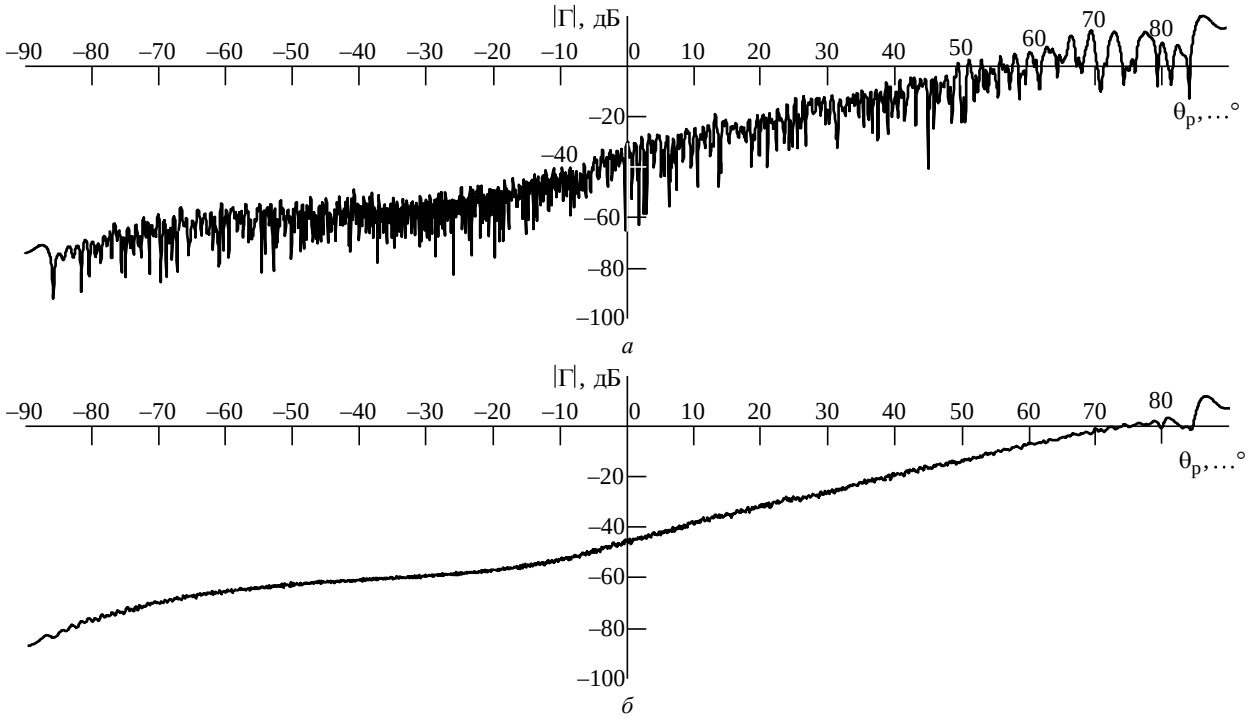


Рис. 5. Бистатическая диаграмма рассеяния реализации морской поверхности:
а – по одной реализации; *б* – усредненная по 100 реализациям

Fig. 5. A bistatic scatter diagram of the realization of the sea surface: *а* – one realizations at a time; *б* – averaged over 100 realizations

рассеяния Γ от угла рассеяния $\theta_р$ при фиксированном угле скольжения θ:

$$\left|\Gamma\left(\theta_р\right)\right| = \left|\Gamma\left(\theta_р,\ \theta\right)\right|_{\theta=\text{const}}. \qquad (17)$$

Бистатическая ДР для реализации волнового профиля морской волны, представленной на рис. 4, *а*, изображена на рис. 5, *а*.

Численный расчет ДР (17) является приближенным. В [7] предложен критерий оценки точности приближенных численных решений дифракционных задач:

$$\int\limits_{-\pi/2}^{\pi/2} \left|\Gamma\left(\theta_р\right)\right| d\theta_р = 1. \qquad (18)$$

Степень отклонения от 1 в (18) служит мерой погрешности всех вычислений. Для представленной на рис. 5, *а* случайной реализации бистатической ДР значение интеграла в (18) равно 1.1, что соответствует погрешности расчета 10 %.

На рис. 5, *б* представлена бистатическая ДР, полученная усреднением 100 ДР для различных реализаций волнового профиля случайной морской волны.

Моделирование волнового профиля случайной морской волны выполнено при тех же значениях параметров, что и для рис. 4, *а*. Средняя (по 100 реализациям) погрешность расчета ЭПР равна 11.8 %.

Критерий (18) является необходимым, но не достаточным. В качестве достаточного критерия справедливости расчета ДР может служить ее соответствие физическим представлениям. По критерию Рэлея моделируемая поверхность близка к гладкой, и при скользящем облучении следует ожидать сильного отражения в зеркальном направлении.

Из рис. 5, *б* следует, что при угле скольжения $\theta = 2°$ большая часть рассеянной энергии сосредоточена в области зеркального отражения в лепестке ДР шириной 2.6° вокруг угла зеркального отражения $\theta_{отр} = \pi/2 - \theta = 88°$. Максимум ДР $\left|\Gamma\left(\theta_р\right)\right| = 11.5$ дБ наблюдается при $\theta_р = 86.3°$. Для угла зеркального отражения $\theta_{отр} = 88°$ модуль коэффициента рассеяния равен 8.35 дБ, в то время как для направления обратного отражения (при угле $\theta_р = \theta - \pi/2 = -88°$) $\left|\Gamma\left(\theta_р\right)\right| = -84.9$ дБ.

Заключение. Предложенная функция усечения (16) не только лучше других удовлетворяет предъявляемым к ним требованиям, но и обеспечивает приемлемую точность оценки ЭПР случайных поверхностей ограниченной длины.

Список литературы

1. Toporkov J. V., Awadallah R. S., Brown G. S. Issues related to the Use of a Gaussian-like Incident Field for Low-grazing-angle Scattering // J. Optical Society of America A. 1999. Vol. 16, № 1. P. 176–187. doi: 10.1364/JOSAA.16.000176

2. Thorsos E. The validity of the Kirchhhoff Approximation for Rough Surface Scattering using Gaussian Roughness Spectrum // J. Acoustical Society of America. 1988. Vol. 83, № 1. P. 78–92. doi: 10.1121/1.396188

3. Pan G., Zhang L. Closed Form Solution to the Incident Power of Gaussian-Like Beam for Scattering Problems // IEEE Trans. on antennas and propagation. 2019. Vol. 67, № 2. P. 1364–1367. doi: 10.1109/TAP.2018.2884851

4. Zhang Y., Wang Y., Zheng H. EM Scattering from a Simple Water Surface composed of Two Time-varying Sinusoidal Waves // Proc. of IEEE Intern. Conf. on Computational Electromagnetics (ICCEM). 2020. Vol. 8. P. 200684–200694. doi: 10.1109/COMPEM.2019.8779021

5. Scattering of Electromagnetic Waves: Numerical Simulations / L. Tsang, J. A. Kong, K.-H. Ding, C. O. Ao. New York: John Wiley & Sons, 2001. 736 p. doi: 10.1002/0471224278

6. Ye H., Jin Y.-Q. Parameterization of the Tapered Incident Wave for Numerical Simulation of Electromagnetic Scattering from Rough Surface // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2005. Vol. 53, № 3. P. 1234–1237. doi: 10.1109/TAP.2004.842586

7. Borodin M. A., Leont'ev V. V. Analysis of the Accuracy of an Iterative Algorithm for Calculating the Field Scattered by a Rough Surface // J. of Communications Technology and Electronics. 2009. Vol. 54, № 9. P. 989–994. doi: 10.1134/S1064226909090034

8. Numerical Analysis of Microwave Scattering from Layered Sea Ice Based on the Finite Element Method / X. Xu, C. Brekke, A. P. Doulgeris, F. Melandso // Remote sensing. 2018. Vol. 10, № 9. P. 1–16. doi: 10.3390/rs10091332

9. Jun M., Guo L-X., Zeng H. Study on 1D Large-scale Rough Surface EM scattering at Low Grazing Incident Angle by Parallel MOM based on PC Clusters // Wave in Random and Complex Media. 2009. Vol. 19, № 4. P. 585–599. doi: 10.1080/17455030903033190

10. Леонтьев В. В., Бородин М. А., Игнатьева О. А. Бистатические диаграммы рассеяния морской поверхности, покрытой мономолекулярной пленкой нефти // Радиотехника. 2012. № 7. С. 39–44.

11. Toporkov J. V., Brown G. S. Numerical Simulations of Scattering from Time-varing Randomly Rough Surfaces // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2000. Vol. 38, № 4. P. 1616–1624. doi: 10.1109/36.851961

12. Johnson J. T., Toporkov J., Brown G. A Numerical Study of Backscattering from Time-evolving Sea Surfaces: Comparison of Hydrodynamic Models // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2001. Vol. 39, № 11. P. 2411–2420. doi: 10.1109/36.964977

13. Numerical Simulation of Backscatter from Linear and Nonlinear Ocean Surface Realization / C. L. Rino, T. L. Crystal, A. K. Koide, H. D. Ngo, H. Guthart // Radio Science. 1991. Vol. 26, № 1. P. 51–71. doi: 10.1029/90RS01687

14. A Unified Directional Spectrum for Long and Shot Wind-driven Waves / T. Elfouhaily, B. Chapron, K. Katsaros, D. Vandemark // J. of Geophysical Research. Oceans. 1997. Vol. 102. № C7. P. 15781–15796. doi: 10.1029/97JC00467

15. Bourlier C., Saillard J., Berginc G. Intrinsic Infrared Radiation of the Sea Surface // Progress in Electromagnetics Research. 2000. Vol. 27. P. 185–335. doi: 10.2528/PIER99080103

Информация об авторах

Леонтьев Виктор Валентинович – доктор технических наук (2000), профессор (2003) кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Почетный работник высшего профессионального образования РФ. Автор более 140 научных и учебно-методических работ. Сфера интересов – радиолокация, распространение и рассеяние радиоволн, радиотехнические системы мониторинга окружающей среды.
Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: vvleontyev@mail.ru
http://orcid.org/0000-0002-6800-7124

Бородин Михаил Анатольевич – кандидат технических наук (2011), доцент кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 29 научных работ. Сфера интересов – радиолокация, распространение и рассеяние радиоволн, радиотехнические системы мониторинга окружающей среды.
Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: boroda84@gmail.com
http://orcid.org/0000-0002-5237-9118

References

1. Toporkov J. V., Awadallah R. S., Brown G. S. Issues related to the Use of a Gaussian-like Incident Field for Low-grazing-angle Scattering. J. Optical Society of America A. 1999, vol. 16, no. 1, pp. 176–187. doi: 10.1364/JOSAA.16.000176

2. Thorsos E. The validity of the Kirchhhoff Approximation for Rough Surface Scattering using Gaussian Roughness Spectrum. J. Acoustical Society of America. 1988, vol. 83, no. 1, pp. 78–92. doi: 10.1121/1.396188

3. Pan G., Zhang L. Closed Form Solution to the Incident Power of Gaussian-Like Beam for Scattering Problems. IEEE Trans. on antennas and propagation. 2019, vol. 67, no. 2, pp. 1364–1367. doi: 10.1109/TAP.2018.2884851

4. Zhang Y., Wang Y., Zheng H. EM Scattering from a Simple Water Surface composed of Two Time-varying Sinusoidal Waves. Proc. of IEEE Intern. Conf. on Computational Electromagnetics (ICCEM). 2020, vol. 8, pp. 200684–200694. doi: 10.1109/COMPEM.2019.8779021

5. Tsang L., Kong J. A., Ding K.-H., Ao C. O. Scattering of Electromagnetic Waves: Numerical Simulations. New York, John Wiley & Sons, 2001, 736 p. doi: 10.1002/0471224278

6. Ye H., Jin Y.-Q. Parameterization of the Tapered Incident Wave for Numerical Simulation of Electromagnetic Scattering from Rough Surface. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2005, vol. 53, no. 3, pp. 1234–1237. doi: 10.1109/TAP.2004.842586

7. Borodin M. A., Leont'ev V. V. Analysis of the Accuracy of an Iterative Algorithm for Calculating the Field Scattered by a Rough Surface. J. of Communications Technology and Electronics. 2009, vol. 54, no. 9, pp. 989–994. doi: 10.1134/S1064226909090034

8. Xu X., Brekke C., Doulgeris A. P., Melandso F. Numerical Analysis of Microwave Scattering from Layered Sea Ice Based on the Finite Element Method. Remote sensing. 2018, vol. 10, no. 9, pp. 1–16. doi: 10.3390/rs10091332

9. Jun M., Guo L-X., Zeng H. Study on 1D Large-scale Rough Surface EM scattering at Low Grazing Incident Angle by Parallel MOM based on PC Clusters. Wave in Random and Complex Media. 2009, vol. 19, no. 4, pp. 585–599. doi: 10.1080/17455030903033190

10. Leont'ev V. V., Borodin M. A., Ignatieva O. A. Bistatic scattering diagrams of the sea surface covered with a monomolecular film of oil. Radio Engineering. 2012, no. 7, pp. 39–44. (In Russ.)

11. Toporkov J. V., Brown G. S. Numerical Simulations of Scattering from Time-varing Randomly Rough Surfaces. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2000, vol. 38, no. 4, pp. 1616–1624. doi: 10.1109/36.851961

12. Johnson J. T., Toporkov J., Brown G. A Numerical Study of Backscattering from Time-evolving Sea Surfaces: Comparison of Hydrodynamic Models. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2001, vol. 39, no. 11, pp. 2411–2420. doi: 10.1109/36.964977

13. Rino C. L., Crystal T. L., Koide A. K., Ngo H. D., Guthart H. Numerical Simulation of Backscatter from Linear and Nonlinear Ocean Surface Realization. Radio Science. 1991, vol. 26, no. 1, pp. 51–71. doi: 10.1029/90RS01687

14. Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D. A Unified Directional Spectrum for Long and Shot Wind-driven Waves. J. of Geophysical Research. Oceans. 1997, vol. 102, no. C7, pp. 15781–15796. doi: 10.1029/97JC00467

15. Bourlier C., Saillard J., Berginc G. Intrinsic Infrared Radiation of the Sea Surface. Progress in Electromagnetics Research. 2000, vol. 27, pp. 185–335. doi: 10.2528/PIER99080103

Information about the authors

Viktor V. Leont'ev, Dr. Sci. (Eng.) (2000), Professor (2003) of the Department of Radio Engineering System of Saint Petersburg Electrotechnical University. Honorable Worker of High Professional Education of the Russian Federation. The author of more than 140 scientific and teaching publications. Area of expertise: radiolocation, propagation and scattering of radio waves, radio engineering system for ecology monitoring.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia
E-mail: vvleontyev@mail.ru
http://orcid.org/0000-0002-6800-7124

Mikhail A. Borodin, Cand. Sci. (Eng.) (2011), assistant professor of the Department of Radio Engineering System of Saint-Petersburg Electrotechnical University. The author of 29 scientific publications. Area of expertise: radiolocation, propagation and scattering of radio waves, radio engineering system for ecology monitoring.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia
E-mail: boroda84@gmail.com
http://orcid.org/0000-0002-5237-9118

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 57–67
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 57–67

Радиолокация и радионавигация

УДК 537.874.2 Оригинальная статья

https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-4-57-67

Экспериментальные и численные исследования диаграмм обратного рассеяния блоков маскирующих цифровых двухбитных метапокрытий

А. И. Семенихин[1], Д. В. Семенихина[1], Ю. В. Юханов[1], П. В. Благовисный[1, 2]✉, И. В. Ильин[1]

[1]Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Таганрог, Россия

[2]Центр фотоники и двумерных материалов Московского физико-технического института, Долгопрудный, Россия

✉pavelblagvisnyy@gmail.com

Аннотация

Введение. Диаграммы рассеяния непоглощающих кодированных шахматно-подобных метапокрытий (МП) для снижения эффективной площади рассеяния (ЭПР) металлических поверхностей объектов неизбежно содержат боковые дифракционные лепестки. В связи с этим актуальна разработка МП с низким уровнем дифракционных лепестков. С этой целью предложено использовать шахматно-подобные МП в виде набора нескольких основных плоских блоков с одинаковыми размерами. В статье рассмотрены 2 таких основных блока МП с разными матрицами кодирования. Ячейки метаповерхности содержат связанные эллиптические кольцевые резонаторы и отличаются двухбитным кодированием угла наклона оси анизотропии. Матрицы кодирования блоков МП построены по блочному принципу.

Цель работы. Экспериментально и численно исследовать диаграммы обратного рассеяния (ДОР) на согласованной (ко-) и ортогональной (кросс-) поляризациях двух разработанных плоских блоков двухбитных цифровых непоглощающих анизотропных МП для различных плоскостей и поляризаций облучения.

Материалы и методы. Полноволновое моделирование блоков МП выполнено в программе HFSS методом конечных элементов. Измерения ДОР изготовленных макетов МП проведены на автоматизированном информационно-вычислительном комплексе АИВК-ТМСА-1.0-40.0-ДБЗ/TD,FD в безэховой камере ЦКП "Прикладная электродинамика и антенные измерения" Южного федерального университета.

Результаты. Снижение моностатических ЭПР двух блоков при нормальном облучении примерно одинаково и составляет не менее 12 дБ в полосе от 9.8 до 21 ГГц. Отмечено хорошее совпадение результатов полноволнового моделирования и измерения ДОР блоков разработанных метапокрытий в области центральных лепестков для различных плоскостей и поляризаций облучения. В главных плоскостях блоки гасят центральные лепестки ДОР на 10...25 дБ; в секторе углов около ±40° обратная ЭПР блоков ниже, чем у эталона. В диагональных плоскостях наблюдается гашение ЭПР на 13...15 дБ и расширение центрального лепестка ДОР на кополяризациях, а также раздвоение этого лепестка на кроссполяризациях в секторе углов ±9°. Вне этого сектора ЭПР блоков соизмерима с ЭПР эталона.

Заключение. Разработанные блоки двухбитных цифровых непоглощающих анизотропных МП могут применяться для широкополосного гашения ЭПР металлических поверхностей.

Ключевые слова: метапокрытие, цифровая метаповерхность, диаграмма обратного рассеяния, снижение ЭПР, твист-эффект, матрица кодирования

Для цитирования: Экспериментальные и численные исследования диаграмм обратного рассеяния блоков маскирующих цифровых двухбитных метапокрытий / А. И. Семенихин, Д. В. Семенихина, Ю. В. Юханов, П. В. Благовисный, И. В. Ильин // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 57–67. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-57-67

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена в ЦКП "Прикладная электродинамика и антенные измерения" Южного федерального университета по гранту Российского научного фонда. Проект № 16-19-10537-П.

Статья поступила в редакцию 06.04.2021; принята к публикации после рецензирования 18.05.2021; опубликована онлайн 29.09.2021

© Семенихин А. И., Семенихина Д. В., Юханов Ю. В., Благовисный П. В., Ильин И. В., 2021

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

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 57–67
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 57–67

Radar and Navigation

Original article

Experimental and Numerical Investigations of Backscatter Patterns of the Blocks of Masking Digital Two-Bit Meta-covers

Andrey I. Semenikhin[1], Diana V. Semenikhina[1], Yury V. Yukhanov[1], Pavel V. Blagovisnyy[1, 2]✉, Igor V. Ilyin[1]

[1]Institute of radio engineering systems and control of Southern Federal University, Taganrog, Russia

[2]Center for Photonics and 2D Materials of Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

✉pavelblagvisnyy@gmail.com

Abstract

Introduction. The scattering patterns of non-absorbing coded checkerboard-like meta-coatings (MCs) applied for reducing the radar cross section (RCS) of metal surfaces inevitably contain side diffraction lobes. Therefore, the development of MCs with a low level of diffraction lobes is relevant. For this purpose, it is proposed to use checkerboard-like MCs in the form of a set of several basic flat blocks with the same dimensions. The paper discusses two such basic MC blocks with different coding matrices. The cells of the metasurface contain two coupled elliptical ring resonators and are distinguished by a 2-bit coding of the tilt angle of the anisotropy axis. Coding matrices of the MC blocks are built according to the block principle.

Aim. To investigate experimentally and numerically backscatter patterns (BSP) for consonant (co-) and orthogonal (cross-) polarizations of the two developed flat blocks of the 2-bit digital nonabsorbing anisotropic MCs for different planes and polarizations of irradiation.

Materials and methods. Full-wave simulation of the MC blocks was carried out using the HFSS software by the finite element method. BSP measurements of the fabricated MC layouts were performed in an anechoic chamber of the Center for Collective Usage "Applied Electrodynamics and Antenna Measurements" of the Southern Federal University using an automated information and computing complex.

Results. The RCS reduction for the two blocks under normal irradiation is approximately the same and not less than 12 dB over the 9.8...21 GHz band. A good matching between the simulation and measurement results of backscattering patterns of the blocks in the region of the central lobes for various planes and polarizations of the irradiation is noted. In the principal planes, the blocks cancel the central lobes of the BSP by 10...25 dB; in the sector of angles of around ±40°, the backward RCS of the blocks is lower than that of the reference. In the diagonal planes, there is a cancellation of the RCS by 13...15 dB and an expansion of the central lobe of the BSP for copolarizations, as well as a bifurcation of this lobe for crosspolarizations in the sector of angles ±9°; outside of this sector the RCSs of the blocks are commensurate with the RCS of the reference.

Conclusion. The developed blocks of the 2-bit digital nonabsorbing anisotropic MCs can be used for broadband cancellation of the RCS of metal surfaces.

Keywords: meta-cover, digital metasurface, backscatter pattern, RCS reduction, twist-effect, coding matrix

For citation: Semenikhin A. I., Semenikhina D. V., Yukhanov Yu. V., Blagovisnyy P. V., Ilyin I. V. Experimental and Numerical Investigations of Backscatter Patterns of the Blocks of Masking Digital Two-Bit Meta-covers. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 57–67. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-57-67

Conflict of interest. Authors declare no conflicts of interest.

Source of financing. The work was performed at the Center for Collective Usage "Applied Electrodynamics and Antenna Measurements" of the Southern Federal University, Russia, and was financially supported by the Russian Science Foundation, Project no. 16-19-10537-P.

Submitted 06.04.2021; accepted 18.05.2021; published online 29.09.2021

Введение. Непоглощающие кодированные шахматно-подобные метапокрытия (МП) интенсивно исследуются в последние десятилетия с целью оценки возможностей и ограничений сверхширокополосного снижения эффективной площади рассеяния (ЭПР) плоских маскируемых поверхностей в различных диапазонах длин волн [1–5]. Концепция кодированных цифровых покрытий предложена в [6–8]. Такие МП состоят из элементарных ячеек различных видов. Однобитные (бинарные) МП состоят из ячеек двух видов, условно обозначаемых битами "0" и "1". Как правило, эти коды соответствуют различным дискретным состояниям фаз коэффициентов отражения волн от элементарных ячеек метапокрытий. Данная концепция расширяется до двухбитного (или мультибитного) кодирования МП [7, 8]. При этом метапокрытие состоит из четырех (или более) видов элементарных ячеек, условно обозначаемых цифровыми двоичными кодами "00", "01", "10", "11". Двухбитное кодирование МП обеспечивает большие возможности управления рассеянным полем в сравнении с однобитным [8].

Физическими механизмами снижения ЭПР являются деструктивная интерференция, поляризационное преобразование и диффузное рассеяние волн различными противофазными участками (модулями) МП. Как следствие, моно- и бистатические диаграммы рассеяния (ДР) однобитных шахматно-подобных МП неизбежно содержат интенсивные боковые дифракционные лепестки (в главных, диагональных и других плоскостях) [9–15]. Они зависят от формы, размеров и кодирования модулей МП. Результаты измерений характеристик бистатического рассеяния от МП при разных углах падения и рассеяния (в секторе ±60°) приведены в [1]. Снижение дифракционных максимумов бистатических диаграмм рассеяния шахматных МП из изотропных метачастиц подробно исследовано при различных поляризациях и углах облучения [2, 3].

Сравнение экспериментальных и расчетных диаграмм обратного рассеяния (ДОР) анизотропных шахматных МП выполнено в [4, 5]. Показано хорошее совпадение результатов симуляции и измерений в главных плоскостях в области трех центральных лепестков ДОР. В этой области ЭПР обратного рассеяния МП ниже ЭПР эталона для кополяризованных ТЕ- и ТМ-волн. В остальных направлениях моностатическая ЭПР метапокрытия превышает ЭПР эталона. Отмечено влияние разнесения в пространстве приемной и передающей антенн экспериментальной установки на результаты измерений [4, 5]. Снижение моно- и бистатических ЭПР в более широких угловых областях облучения и рассеяния можно улучшить с помощью различных процедур оптимизации метаповерхностей [16].

Кривизна маскируемой поверхности снижает эффективность применения даже однобитных матриц кодирования, разработанных для плоских протяженных МП [17, 18]. Гашение рассеянного поля криволинейного МП приближенно определяется законом кодирования модулей лишь на "блестящем" участке метапокрытия, а также влиянием соседних зон Френеля.

Понятие "матрицы кодирования" плоских протяженных цифровых МП теряет смысл в случае криволинейных МП. Авторы настоящей статьи предлагают использовать МП в виде набора нескольких основных плоских блоков с одинаковыми размерами и разными матрицами кодирования. При этом актуальным становится вопрос о выборе модулей и матриц кодирования основных блоков МП [19, 20].

В настоящей статье предложены 2 основных блока широкополосных анизотропных двухбитных тонких МП (далее обозначенные как блоки I и II). Численно и экспериментально исследованы ДОР блоков и снижение бистатической и моностатической ЭПР на ко- и кроссполяризациях при облучении блоков в главных и в диагональных плоскостях.

Методы исследования. Симуляция моно- и бистатических диаграмм рассеяния блоков проводилась в HFSS методом конечных элементов. Полноволновые модели разработанных метачастиц и эскизы основных блоков I и II тонких двухбитных МП показаны на рис. 1 и 2. Блоки содержат экранированную подложку F4B $\left(\varepsilon = 2.65;\ \operatorname{tg}\delta = 0.009\right)$ толщиной 3 мм квадратной формы (192 × 192 мм) и верхнюю метаповерхность с единичными ячейками размером и шагом размещения 8 × 8 мм. В ячейках находятся 4 типа метачастиц (МЧ) толщиной 35 мкм (рис. 1, *а–г*), которые представляют собой 2 связанных эллиптических кольцевых резонатора с разной ориентацией оси анизотропии: 0° (далее обозначается "00"), 45° ("01"), 90° ("10") и 135° ("11") [19]. Большая и малая полуоси внешнего эллипса МЧ "00", "10" равны 1.9 и 1 мм соответственно, внутреннего – 1.615 и 0.85 мм. Для МЧ "01", "11" аналогичные

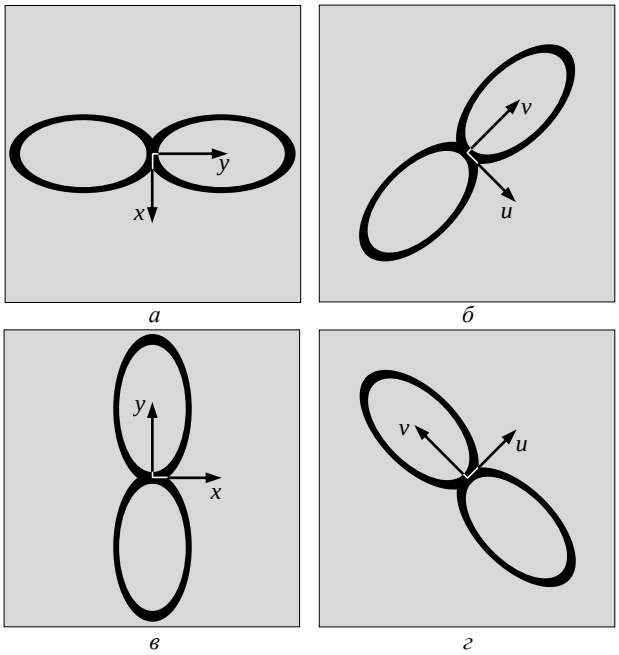


Рис. 1. Метачастицы: *а* – "00"; *б* – "01"; *в* – "10"; *г* – "11"

Fig. 1. Metaparticles: *а* – "00"; *б* – "01"; *в* – "10", *г* – "11"

полуоси внешнего эллипса равны 2.07 и 0.9 мм, внутреннего – 1.84 и 0.8 мм [19].

Блоки I и II состоят из 16 модулей с номерами $n=1, \ldots, 4$ (по оси *Y*), $m=1, \ldots, 4$ (по оси *X*) размером 48 × 48 мм (рис. 2). Каждый модуль содержит 36 метачастиц одного типа. Матрицы кодирования $\|\varepsilon_{nm}\|$ блоков I и II строились по блочному принципу [20]:

$$\|\varepsilon_{nm}\| = \begin{vmatrix} 00 & 01 & 11 & 10 \\ 11 & 10 & 00 & 01 \\ 10 & 11 & 01 & 00 \\ 01 & 00 & 10 & 11 \end{vmatrix} \text{ – для блока I;}$$

$$\|\varepsilon_{nm}\| = \begin{vmatrix} 10 & 01 & 00 & 11 \\ 11 & 00 & 01 & 10 \\ 01 & 10 & 11 & 00 \\ 00 & 11 & 10 & 01 \end{vmatrix} \text{ – для блока II.}$$

Изготовленные макеты блоков I и II показаны на рис. 3. Штриховыми линиями P1, P2 и D1, D2 (рис. 3) обозначены проекции главных $(\varphi_1 = 0°, \varphi_2 = 90°)$ и диагональных $(\varphi_3 = 45°, \varphi_4 = 135°)$ плоскостей соответственно на поверхность блоков МП. Угол φ отсчитывается от оси *X* против часовой стрелки (рис. 2). Далее символы P1, P2 и D1, D2 распространены на обозначения главных и диагональных плоскостей, имеющих указанные проекции.

Измерения ЭПР блоков проводились в безэховой камере ЦКП "Прикладная электродинамика и антенные измерения" ЮФУ на автоматизированном информационно-вычислительном комплексе АИВК-ТМСА-1.0-40.0-ДБ3/TD, FD на квазиоднопозиционной установке (угол базы 7°) в полосе от 7 до 17.5 ГГц на согласной (ко-ЭПР) и кроссовой (кросс-ЭПР) поляризациях. Блоки устанавливались на опорно-поворотном устройстве в радиопрозрачном лонжероне в двух положениях – П0 и П45 (рис. 4). Измерялись частотные характеристики моностатической ЭПР при облучении блоков вблизи нормали, а также диаграммы обратного рассеяния при изменении угла облучения. Угол облучения изменялся в плоскостях P2 и D2 (рис. 3). Блоки облучались волной параллельной поляризации (волна TM, вектор напряженности электрического поля **E** параллелен плоскости P2 или D2) или перпендикулярной поляризации (волна TE, вектор напряженности электрического поля параллелен P1 или D1). В качестве эталона при оценке снижения ЭПР использовалась металлическая пластина аналогичных размеров.

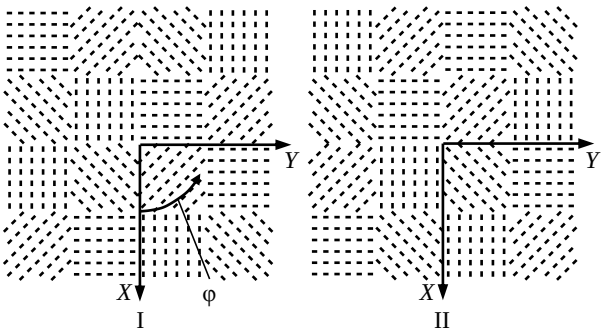


Рис. 2. Эскизы основных блоков

Fig. 2. Schematic representation of the main blocks

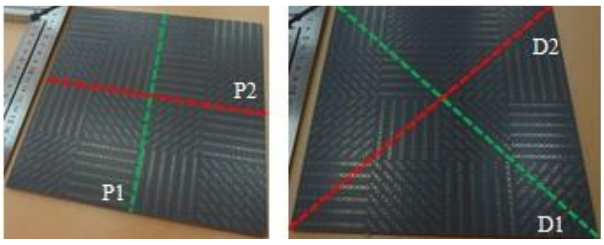


Рис. 3. Макеты разработанных блоков анизотропных МП

Fig. 3. Prototypes of the developed blocks of anisotropic meta-covers

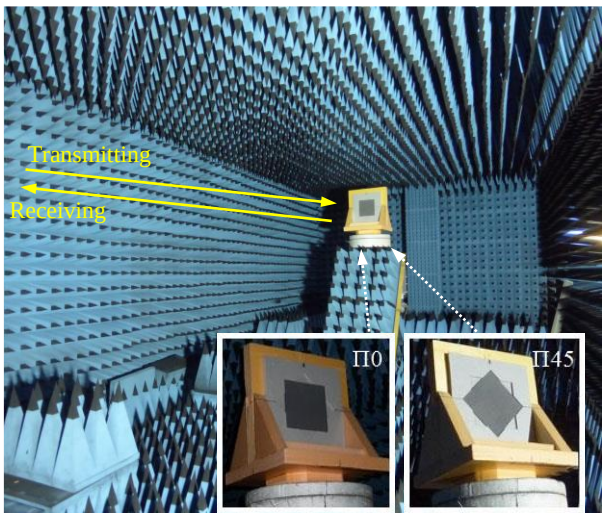


Рис. 4. Расположение макета в безэховой камере в позициях П0 и П45

Fig. 4. Disposition of a prototype in an anechoic chamber at positions П0 and П45

Результаты исследований. Результаты измерений и симуляции частотных характеристик снижения моностатических ЭПР блоков относительно эталона на кополяризации представлены на рис. 5 (для блока I) и 6 (для блока II) при различных плоскостях поляризации. Из рисунков следует хорошее соответствие измеренных и рассчитанных уровней снижения ЭПР для различных поляризаций облучения. Снижение ЭПР для двух блоков примерно одинаково и составляет не менее 12 дБ в полосе от 10 до 17.5 ГГц (эксперимент) и от 9.8 до 21 ГГц (симуляция).

На рис. 7 и 8 приведены результаты измерения ДОР эталона (кривые *1*) в сравнении с результатами симуляции (кривые *2*) и экспериментального определения (кривые *3*) ДОР блока I на кополяризации и блока II на кроссполяризации на средней частоте 12 ГГц. Несимметрия ДОР эталона объясняется небольшим разнесением приемной и передающей антенн в пространстве. ДОР блока I на кроссполяризации и блока II на кополяризации аналогичны представленным.

ЭПР блоков в главной плоскости P2 меньше, чем ЭПР эталона на кополяризации, в секторах углов облучения ±30° (на кополяризации) и ±40° (на кроссполяризации) (рис. 7). Метапокрытия гасят центральные лепестки ДОР (по сравнению с эталоном) на 10…25 дБ на ко- и кроссполяризациях.

Центральный лепесток ДОР в диагональной плоскости D2 на кополяризациях уменьшается на 13…15 дБ и расширяется примерно в 2 раза, занимая сектор углов облучения ±9° (рис. 8, *а*). Вне этого сектора ДОР блоков не имеют интенсивных дифракционных лепестков и ЭПР блоков сравнима с ЭПР эталона. На кроссполяризациях центральный лепесток раздваивается и имеет глубокий провал (до 35 дБ) при нормальном падении из-за противофазности полей модулей "00", "10" и "01", "11" (рис. 8, *б*).

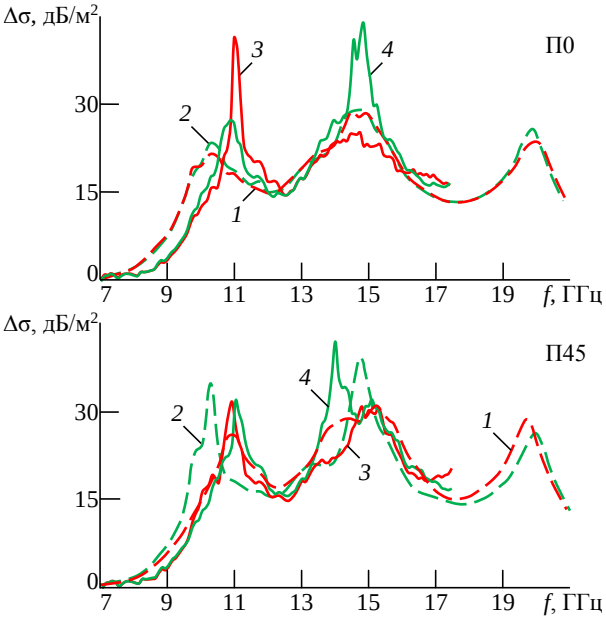


Рис. 5. Верификация снижения ЭПР блока I:
1 – плоскость P1, симуляция; *2* – P2, симуляция;
3 – P1, эксперимент; *4* – P2, эксперимент

Fig. 5. Verification of RCS reduction for block I:
1 – plane P1, simulation; *2* – P2, simulation;
3 – P1, experiment; *4* – P2, experiment

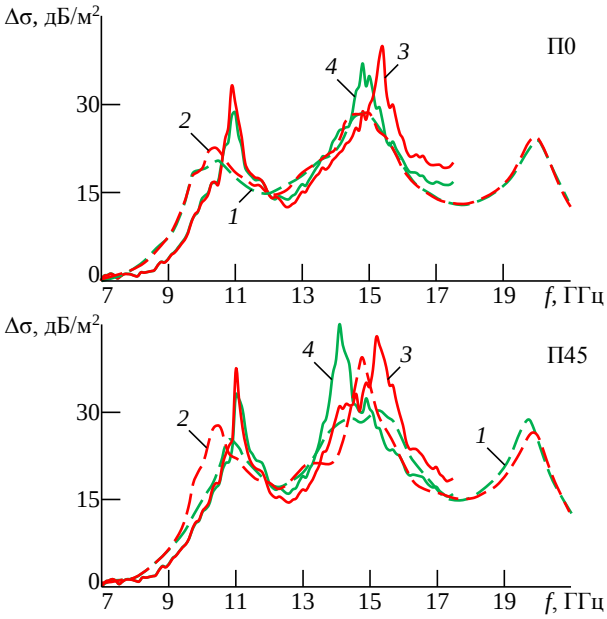


Рис. 6. Верификация снижения ЭПР блока II:
1 – плоскость P1, симуляция; *2* – P2, симуляция;
3 – P1, эксперимент; *4* – P2, эксперимент

Fig. 6. Verification of RCS reduction for the block II:
1 – plane P1, simulation; *2* – P2, simulation;
3 – P1, experiment; *4* – P2, experiment

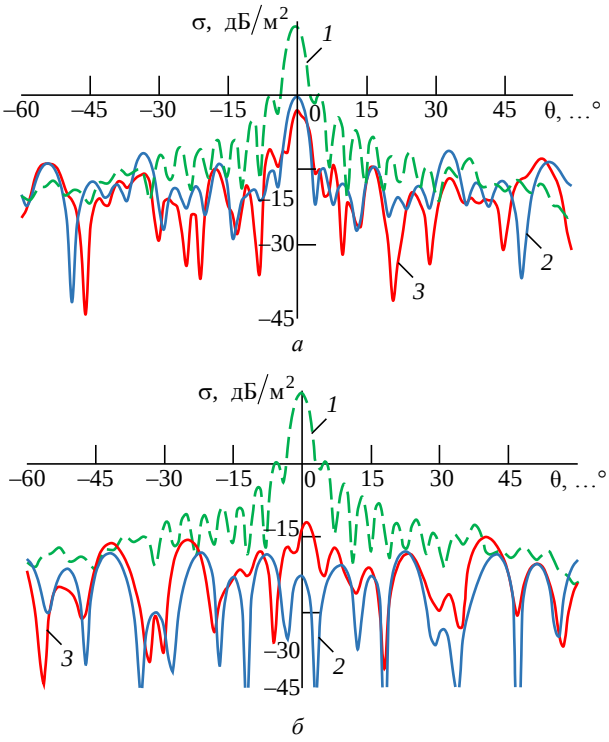


Рис. 7. ДОР эталона (*1*), блока I на кополяризации (*а*) и блока II на кроссполяризации (*б*) в главной плоскости P2 (вектор **E** параллелен P1). Результаты симуляции (*2*) и эксперимента (*3*)

Fig. 7. Backscatter diagram of the reference (*1*), block I on copolarization (*а*) and block II on crosspolarization (*б*) in the main plane P2 (vector **E** is parallel to P1). Results of simulation (*2*) and experiment (*3*)

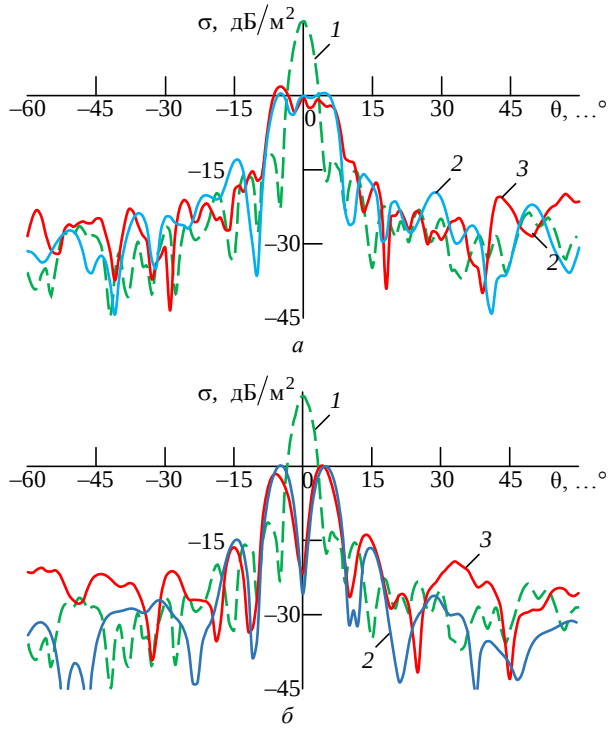


Рис. 8. ДОР эталона (*1*), блока I на кополяризации (*а*) и блока II на кроссполяризации (*б*) в диагональной плоскости D2 (вектор **E** параллелен D1). Результаты симуляции (*2*) и эксперимента (*3*)

Fig. 8. Backscatter diagram of the reference (*1*), block I on copolarization (*а*) and block II on crosspolarization (*б*) in the diagonal plane D2 (vector **E** is parallel to D1). Results of simulation (*2*) and experiment (*3*)

Расширение центрального лепестка ДОР на кополяризациях и раздвоение этого лепестка на кроссполяризациях иллюстрируют рассчитанные диаграммы бистатического рассеяния двух блоков при изменении угла падения θ_{inc} и угла рассеяния θ_{scat} в диагональной плоскости (рис. 9). Штриховые линии на рис. 9 ограничивают области углов падения $\theta_{inc} = \pm 5°$ и рассеяния $\theta_{scat} = \pm 5°$ (относительно нормали к метапокрытию), соответствующие интенсивным лепесткам бистатической ДР. Видно формирование вблизи нормали широкой (рис. 9, *а*, *б*) или двухлепестковой (рис. 9, *в*, *г*) области рассеяния на ко- и кроссполяризациях соответственно.

Симуляция показала, что аналогичные ДОР наблюдаются при облучении блоков в других плоскостях и на других рабочих частотах. В качестве иллюстрации на рис. 10 и 11 изображены 3D-диаграммы рассеяния блока I на кополяризации и кроссполяризации соответственно при трех углах падения в плоскости *X*0*Z* (в плоскости P1) на частоте 10 ГГц. Как следует из приведенных 3D-диаграмм, область глубокого гашения ДОР на обеих поляризациях с ростом угла падения смещается в направлении, противоположном направлению на источник.

Обсуждение. В настоящей статье предложено для снижения ЭПР использовать цифровые шахматно-подобные анизотропные метапокрытия в виде наборов нескольких основных плоских блоков с одинаковыми размерами и разными матрицами кодирования. Исследовано снижение моностатической и бистатической ЭПР на ко- и кроссполяризациях для двух разработанных плоских блоков МП.

Симуляция показала, что уровень снижения ЭПР двух блоков при нормальном облучении примерно одинаков и составляет не менее 12 дБ в полосе от 9.8 до 21 ГГц. Измерения на частотах от 7 до 17.5 ГГц показали это же значение снижения ЭПР в полосе от 10 до 17.5 ГГц.

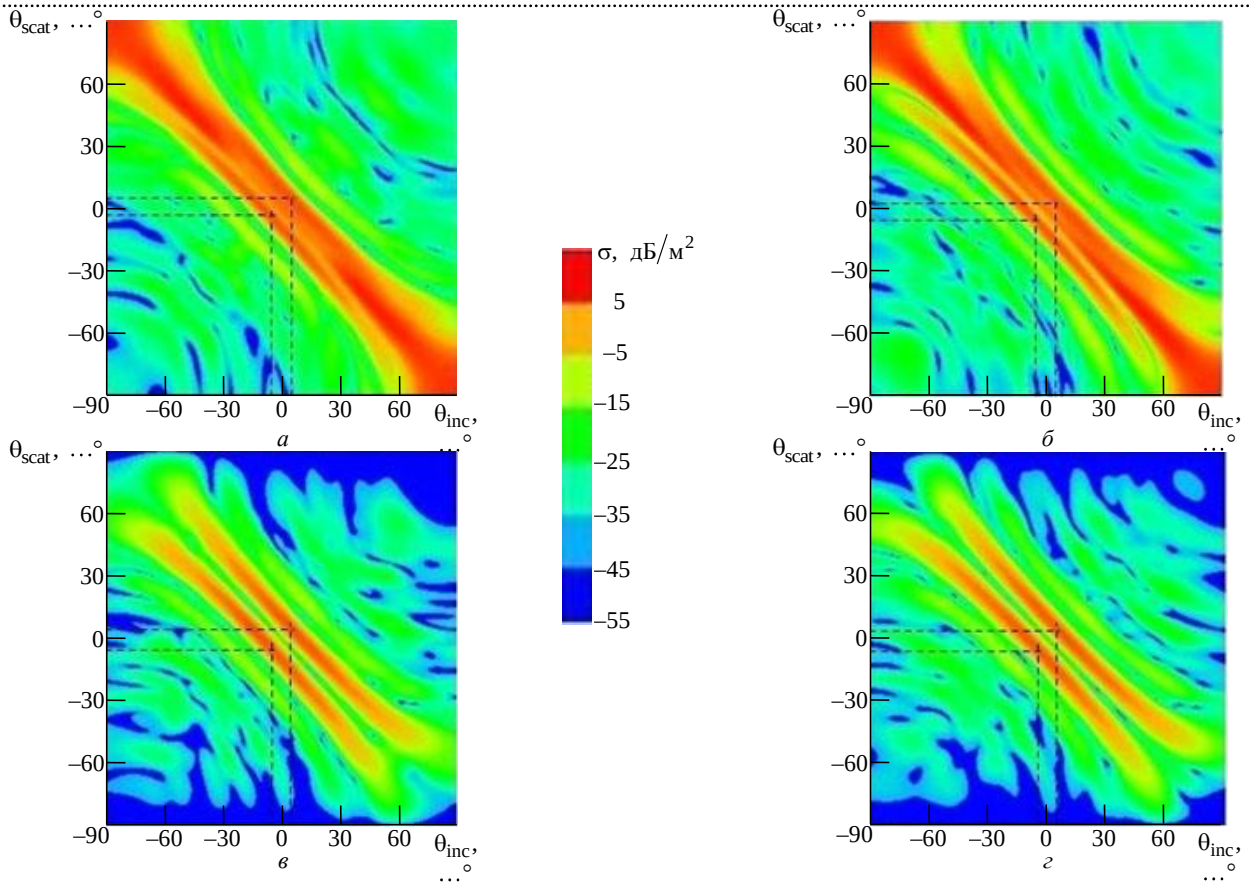


Рис. 9. 2D-диаграммы бистатического рассеяния для блоков I (*а*, *в*) и II (*б*, *г*) на кополяризации (*а*, *б*) и кроссполяризации (*в*, *г*) при изменении углов падения θ_{inc} и рассеяния θ_{scat} в диагональной плоскости D2 (вектор **E** параллелен D1)

Fig. 9. 2D-patterns of bistatic scattering for blocks I (*а*, *в*) and II (*б*, *г*) for copolarization (*а*, *б*) and crosspolarization (*в*, *г*) when the incidence θ_{inc} and scattering θ_{scat} angles are changing in the diagonal plane D2 (vector **E** is parallel to D1)

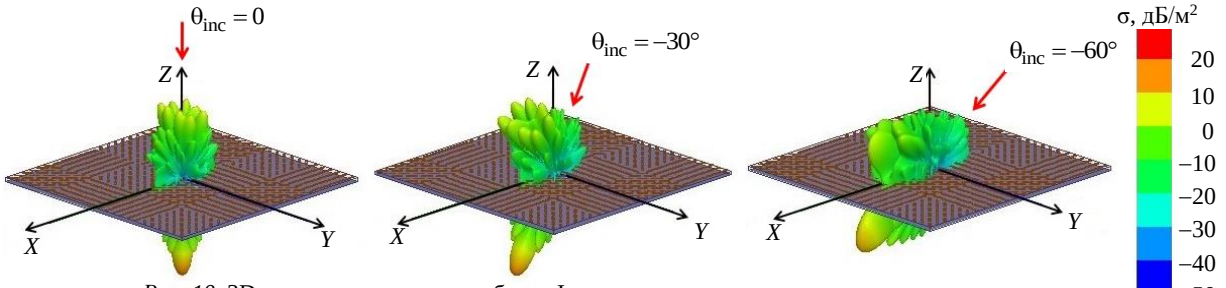


Рис. 10. 3D-диаграммы рассеяния блока I на кополяризации при различных углах падения в плоскости P1 (вектор **E** параллелен P2)

Fig. 10. 3D-scattering patterns of block I for copolarization with different angles of incidence in the plane P1 (vector **E** is parallel to P2)

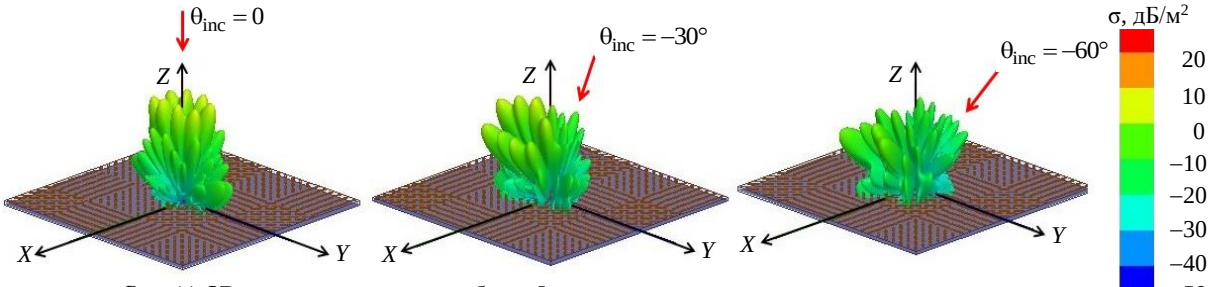


Рис. 11. 3D-диаграммы рассеяния блока I на кроссполяризации при различных углах падения в плоскости P1 (вектор **E** параллелен P2)

Fig. 11. 3D-scattering patterns of block I for crosspolarization with different angles of incidence in the plane P1 (vector **E** is parallel to P2)

Получено хорошее совпадение результатов симуляции и измерения ДОР блоков в области центральных лепестков для различных плоскостей и поляризаций облучения. В главных плоскостях блоки гасят центральные лепестки ДОР на 10…25 дБ; в секторе углов около ±40° обратная ЭПР блоков ниже, чем у эталона. В диагональных плоскостях наблюдается гашение на 13…15 дБ и расширение (примерно в 2 раза) центрального лепестка ДОР на кополяризациях, а также раздвоение этого лепестка на кроссполяризациях в секторе углов ±9° (вне этого сектора ЭПР блоков сравнима с ЭПР эталона). Обнаруженное расширение центрального лепестка ДОР на кополяризации и раздвоение этого лепестка на кроссполяризации проиллюстрированы диаграммами бистатического рассеяния блоков при изменении углов падения и рассеяния. Область глубокого гашения ЭПР на обеих поляризациях с ростом угла падения синхронно смещается в зеркальном направлении.

Разработанные блоки цифровых МП могут применяться для широкополосного гашения ЭПР металлических поверхностей.

Авторский вклад

Семенихин Андрей Илларионович – полноволновое моделирование блока I.

Семенихина Диана Викторовна – полноволновое моделирование блока II.

Юханов Юрий Владимирович – постановка исследований, обсуждение результатов.

Благовисный Павел Вадимович – полноволновое моделирование метачастиц, расчет ДОР, обработка результатов измерений ДОР.

Ильин Игорь Васильевич – проведение измерений ЭПР блоков.

Author's contribution

Andrey I. Semenikhin, full-wave simulation of the block I.

Diana V. Semenikhina, full-wave simulation of the block II.

Yury V. Yukhanov, setting the researches, discussion of the results.

Pavel V. Blagovisnyy, full-wave simulation of the metaparticles, calculation of the BSP, results processing of the BSP measurements.

Igor V. Ilyin, measurements implementation of the blocks' RCS.

Список литературы

1. Thin AMC Structure for Radar Cross-Section Reduction / M. Paquay, J.-C. Iriarte, I.Ederra, R. Gonzalo, P. de Maagt // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 2007. Vol. 55, iss. 12. P. 3630–3638. doi: 10.1109/tap.2007.910306

2. Chen W., Balanis C. A., Birtcher C. R. Checkerboard EBG Surfaces for Wideband Radar Cross Section Reduction // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 2015. Vol. 63, iss. 6. P. 2636–2645. doi: 10.1109/tap.2015.2414440

3. Chen W., Balanis C. A., Birtcher C. R. Dual Wide-Band Checkerboard Surfaces for Radar Cross Section Reduction // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 2016. Vol. 64, iss. 9. P. 4133–4138. doi: 10.1109/tap.2016.2583505

4. Jiang W., Xue Y., Gong S.-X. Polarization Conversion Metasurface for Broadband Radar Cross Section Reduction // Progress In Electromagnetics Research Lett. 2016. Vol. 62. P. 9–15. doi: 10.2528/pierl16060504

5. Broadband Radar Cross-Section Reduction using Polarization Conversion Metasurface / Q. Zheng, C. Guo, H. Li, J. Ding // Intern. J. of Microwave and Wireless Technologies. 2018. Vol. 10, iss. 2. P. 197–206. doi: 10.1017/s1759078717001477

6. Петров Б. М., Семенихин А. И. Управляемые импедансные покрытия и структуры // Зарубежная радиоэлектроника. 1994. № 6. С. 9–16.

7. Giovampaola C. D., Engheta N. Digital metamaterials // Nature Materials. 2014. Vol. 13, iss. 12. P. 1115–1121. doi: 10.1038/nmat4082

8. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials / T. J. Cui, M. Q. Qi, X. Wan, J. Zhao, Q. Cheng // Light: Science & Applications. 2014. Vol. 3, iss. 10. P. e218–e218. doi: 10.1038/lsa.2014.99

9. Broadband Radar Cross-Section Reduction Using AMC Technology / J. C. I. Galarregui, A. T. Pereda, J. L. M. de Falcon, I. Ederra, R. Gonzalo, P. de Maagt // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 2013. Vol. 61, iss. 12. P. 6136–6143. doi: 10.1109/tap.2013.2282915

10. Edalati A., Sarabandi K. Wideband, Wide Angle, Polarization Independent RCS Reduction Using Nonabsorptive Miniaturized-Element Frequency Selective Surfaces / IEEE Trans. on Ant. and Prop. 2014. Vol. 62, iss. 2. P. 747–754. doi: 10.1109/tap.2013.2291236

11. A Wideband and Polarization-Independent Metasurface Based on Phase Optimization for Monostatic and Bistatic Radar Cross Section Reduction / J. Su, Y. Lu, Z. Li, R. Zhang, Y. Yang // Intern. J. of Ant. and Prop. 2016. Vol. 2016. Art. ID 7595921. P. 1–9. doi: 10.1155/2016/7595921

12. Zhuang Y.-Q., Wang G.-M., Xu H.-X. Ultra-Wideband RCS Reduction using Novel Configured Chessboard Metasurface // Chinese Physics B. 2017. Vol. 26, iss. 5. Art. ID 054101. 7 p. doi: 10.1088/1674-1056/26/5/054101

13. Libi Mol V. A. H., Aanandan C. K. Wideband Radar Cross Section Reduction using Artificial Magnetic Conductor Checkerboard Surface // Progress In Electromagnetics Research M. 2018. Vol. 69. P. 171–183. doi: 10.2528/pierm18030303

14. Design of a Low Scattering Metasurface for Stealth Applications / T. A. Khan, J. Li, J. Chen, M. U. Raza, A. Zhang // Materials. 2019. Vol. 12, iss. 18. Art. ID 3031. doi: 10.3390/ma12183031

15. Taher Al-Nuaimi M. K., Hong W. Monostatic RCS Reduction at mmWaves // Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC), Nanjing, China, 6–9 Dec. 2015. Acc. № 15803186. doi: 10.1109/apmc.2015.7413385

16. Ultrawideband Monostatic and Bistatic RCS Reductions for Both Copolarization and Cross Polarization Based on Polarization Conversion and Destructive Interference / Y. Lu, J. Su, J. Liu, Q. Guo, H. Yin, Z. Li, J. Song // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 2019. Vol. 67, iss. 7. P. 4936–4941. doi: 10.1109/tap.2019.2911185

17. Cylindrically Curved Checkerboard Surfaces for Radar Cross-Section Reduction / W. Chen, C. A. Balanis, C. R. Birtcher, A. Y. Modi // IEEE Ant. and Wireless Prop. Lett. 2018. Vol. 17, iss. 2. P. 343–346. doi: 10.1109/lawp.2018.2789906

18. Reduction and Cancellation of the RCS of Cylindrical Surfaces using Conformal Digital 1-bit Meta-covers/ A. I. Semenikhin, D. V. Semenikhina, Yu. V. Yukhanov, P. V. Blagovisnyy // Intern. Symp. ELMAR. Zadar, Croatia, 23–25 Sept. 2019. P. 167–170. doi: 10.1109/elmar.2019.8918812

19. Broadband RCS Reduction using Digital Impedance Metasurfaces with 2-bit Coding of Axes of Anisotropy and Eigen Reactances / A. I. Semenikhin, D. V. Semenikhina, Yu. V. Yukhanov, P. V. Blagovisnyy // Progress in Electromagnetics Research Symp. (PIERS). Toyama, Japan, 1–4 Aug. 2018. doi: 10.23919/piers.2018.8597701

20. Block Principle of Constructing and Estimating of the RCS Reduction of Nonabsorbing Broadband 2 Bit Anisotropic Digital Meta-Coatings / A. I. Semenikhin, D. V. Semenikhina, Yu. V. Yukhanov, P. V. Blagovisnyy // 7th All-Russian Microwave Conf. (RMC), Moscow, 25–27 Nov. 2020. P. 132–134. doi: 10.1109/rmc50626.2020.9312245

Информация об авторах

Семенихин Андрей Илларионович – кандидат технических наук (1984), доцент (1987) кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета (ИРСУ ЮФУ). Почетный работник высшего профессионального образования РФ (2006). Автор более 270 научных и учебно-методических работ. Сфера научных интересов – электродинамика анизотропных структур и метаповерхностей, управление характеристиками рассеяния, интеллектуальные покрытия.
Адрес: ИРСУ ЮФУ, Некрасовский пер., д. 44, Таганрог, Ростовская область, 347922, Россия
E-mail: anilsem@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0601-7263

Семенихина Диана Викторовна – доктор технических наук (2000), доцент (1993), профессор кафедры антенн и радиопередающих устройств ИРСУ ЮФУ. Автор более 200 научных и учебно-методических работ. Сфера научных интересов – электродинамика нелинейных структур и метаповерхностей, управление спектральными характеристиками рассеяния.
Адрес: ИРСУ ЮФУ, Некрасовский пер., д. 44, Таганрог, Ростовская область, 347922, Россия
E-mail: d_semenihina@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-1899-5961

Юханов Юрий Владимирович – доктор технических наук (1997), профессор (2000), заведующий кафедрой антенн и радиопередающих устройств ИРСУ ЮФУ. Почетный работник высшего профессионального образования РФ (2007). Автор более 300 научных и учебно-методических работ. Сфера научных интересов – прямые и обратные задачи электродинамики, синтез импедансных структур по заданным характеристикам излучения и рассеяния.
Адрес: ИРСУ ЮФУ, Некрасовский пер., д. 44, Таганрог, Ростовская область, 347922, Россия
E-mail: yu_yukhanov@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-8448-5508

Благовисный Павел Вадимович – дипломированный инженер-механик (2010, Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина), аспирант кафедры антенн и радиопередающих устройств ИРСУ ЮФУ, инженер центра фотоники и двумерных материалов Московского физико-технического института (национального исследовательского университета). Автор 14 научных работ. Сфера научных интересов – рассеяние электромагнитных волн импедансными анизотропными структурами.
Адрес: Центр фотоники и двумерных материалов Московского физико-технического института, Институтский пер., д. 9, Долгопрудный, Московская область, 141701, Россия
E-mail: pavelblagvisnyy@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-3170-2617

Ильин Игорь Васильевич – младший научный сотрудник Центра коллективного пользования "Прикладная электродинамика и антенные измерения" ЮФУ. Окончил Таганрогский радиотехнический институт (1975) по специальности "Радиотехника". Автор 27 научных работ, обладатель 24 авторских свидетельств. Сфера научных интересов – общая схемотехника, устройства управления и автоматики на микроконтроллерах и микропроцессорах.
Адрес: ИРСУ ЮФУ, Некрасовский пер., д. 44, Таганрог, Ростовская область, 347922, Россия
E-mail: ivi.igor@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-8585-4256

References

1. Paquay M., Iriarte J.-C., Ederra I., Gonzalo R., de Maagt P. Thin AMC Structure for Radar Cross-Section Reduction. IEEE Trans. on Antenn. and Propag. 2007, vol. 55, iss. 12, pp. 3630–3638. doi: 10.1109/tap.2007.910306

2. Chen W., Balanis C. A., Birtcher C. R. Checkerboard EBG surfaces for wideband radar cross section reduction. IEEE Trans. on Antenn. and Propag. 2015, vol. 63, iss. 6, pp. 2636–2645. doi: 10.1109/tap.2015.2414440

3. Chen W., Balanis C. A., Birtcher C. R. Dual wideband checkerboard surfaces for radar cross section reduction. IEEE Trans. on Antenn. and Propag. 2016, vol. 64, iss. 9, pp. 4133–4138. doi: 10.1109/tap.2016.2583505

4. Jiang W., Xue Y., Gong S.-X. Polarization conversion metasurface for broadband radar cross section reduction. Progress In Electromagnetics Research Lett. 2016, vol. 62, pp. 9–15. doi: 10.2528/pierl16060504

5. Zheng Q., Guo C., Li H., Ding J. Broadband radar cross-section reduction using polarization conversion metasurface. Intern. J. of Microwave and Wireless Technologies. 2018, vol. 10, iss. 2, pp. 197–206. doi: 10.1017/s1759078717001477

6. Petrov B. M., Semenikhin A. I. Controlled impedance coatings and structures. Foreign radio-electronics. 1994, no. 6, pp. 9–16. (In Russ.)

7. Giovampaola C. D., Engheta N. Digital metamaterials. Nature Materials. 2014, vol. 13, iss. 12, pp. 1115–1121. doi: 10.1038/nmat4082

8. Cui T. J., Qi M. Q., Wan X., Zhao J., Cheng Q. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. Light: Science & Applications. 2014, vol. 3, iss. 10, pp. e218–e218. doi: 10.1038/lsa.2014.99

9. Galarregui J. C. I., Pereda A. T., de Falcon J. L. M., Ederra I., Gonzalo R., de Maagt P. Broadband Radar Cross-Section Reduction Using AMC Technology. IEEE Trans. on Ant. and Prop. 2013, vol. 61, iss. 12, pp. 6136–6143. doi: 10.1109/tap.2013.2282915

10. Edalati A., Sarabandi K. Wideband, Wide Angle, Polarization Independent RCS Reduction Using Nonabsorptive Miniaturized-Element Frequency Selective Surfaces. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2014, vol. 62, iss. 2, pp. 747–754. doi: 10.1109/tap.2013.2291236

11. Su J., Lu Y., Li Z., Zhang R., Yang Y. A Wideband and Polarization-Independent Metasurface Based on Phase Optimization for Monostatic and Bistatic Radar Cross Section Reduction. Intern. J. of Antennas and Propagation. 2016, vol. 2016, pp. 1–9. doi: 10.1155/2016/7595921

12. Zhuang Y.-Q., Wang G.-M., Xu H.-X. Ultra-wideband RCS reduction using novel configured chessboard metasurface. Chinese Physics B. 2017, vol. 26, iss. 5, art. ID 054101, 7 p. doi: 10.1088/1674-1056/26/5/054101

13. Libi Mol V. A. H., Aanandan C. K. Wideband Radar Cross Section Reduction Using Artificial Magnetic Conductor Checkerboard Surface. Progress In Electromagnetics Research M. 2018, vol. 69, pp. 171–183. doi: 10.2528/pierm18030303

14. Khan T. A., Li J., Chen J., Raza M. U., Zhang A. Design of a Low Scattering Metasurface for Stealth Applications. Materials. 2019, vol. 12, iss. 18, p. 3031. doi: 10.3390/ma12183031

15. Taher Al-Nuaimi M. K., Hong W. Monostatic RCS reduction at mmWaves. Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC), Nanjing, China, 6–9 Dec. 2015. doi: 10.1109/apmc.2015.7413385

16. Lu Y., Su J., Liu J., Guo Q., Yin H., Li Z., Song J. Ultrawideband Monostatic and Bistatic RCS Reductions for Both Copolarization and Cross Polarization Based on Polarization Conversion and Destructive Interference. IEEE Trans. on Antenn. and Propag. 2019, vol. 67, iss. 7, pp. 4936–4941. doi: 10.1109/tap.2019.2911185

17. Chen W., Balanis C. A., Birtcher C. R., Modi A. Y. Cylindrically curved checkerboard surfaces for radar cross-section reduction. IEEE Anten. and Wireless Propag. Lett. 2018, vol. 17, iss. 2, pp. 343–346. doi: 10.1109/lawp.2018.2789906

18. Semenikhin A. I., Semenikhina D. V., Yukhanov Yu. V., Blagovisnyy P. V. Reduction and Cancellation of the RCS of Cylindrical Surfaces Using Conformal Digital 1-bit Meta-covers. Intern. Symp. ELMAR, Zadar, Croatia, 23–25 Sept. 2019, pp. 167–170. doi: 10.1109/elmar.2019.8918812

19. Semenikhin A. I., Semenikhina D. V., Yukhanov Yu. V., Blagovisnyy P. V. Broadband RCS Reduction Using Digital Impedance Metasurfaces With 2-bit Coding of Axes of Anisotropy and Eigen Reactances. Progress in Electromagnetics Research Symp. (PIERS), Toyama, Japan, 1–4 Aug. 2018. doi: 10.23919/piers.2018.8597701

20. Semenikhin A. I., Semenikhina D. V., Yukhanov Yu. V., Blagovisnyy P. V. Block Principle of Constructing and Estimating of the RCS Reduction of Nonabsorbing Broadband 2 Bit Anisotropic Digital Meta-Coatings. 7th All-Russian Microwave Conf. (RMC), Moscow, Russia, 25–27 Nov. 2020, pp. 132–134. doi: 10.1109/rmc50626.2020.9312245

Information about the authors

Andrey I. Semenikhin, Cand. Sci. (Eng.) (1984), docent (1987) of the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices of Institute of Radio Engineering Systems and Control of Southern Federal University (IRESC SFU). Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation (2006). The author of more than 270 scientific and educational-methodical publications. Area of expertise: electrodynamics of anisotropic structures and metasurfaces, control of scattering characteristics, smart coatings.
Address: IRESC SFU, 44 Nekrasovsky Ln., Taganrog, Rostov Region 347922, Russia
E-mail: anilsem@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0601-7263

Diana V. Semenikhina, Dr. Sci. (Eng.) (2000), Professor (1993) of the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices of IRESC SFU. The author of more than 200 scientific and educational-methodical publications. Area of expertise: electrodynamics of nonlinear structures and metasurfaces, control of spectral scattering characteristics.
Address: IRESC SFU, 44 Nekrasovsky Ln., Taganrog, Rostov Region 347922, Russia
E-mail: d_semenihina@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-1899-5961

Yury V. Yukhanov, Dr. Sci. (Eng.) (1997), Professor (2000), the Head of the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices of IRESC SFU. Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation (2007). The author of more than 300 scientific and educational-methodical publications. Area of expertise: direct and inverse problems of electrodynamics, synthesis of impedance structures according to given characteristics of radiation and scattering.
Address: IRESC SFU, 44 Nekrasovsky Ln., Taganrog, Rostov Region 347922, Russia
E-mail: yu_yukhanov@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-8448-5508

Pavel V. Blagovisnyy, mechanical engineer (2010, Russian state university of oil and gas named after I. M. Gubkin), post-graduate student of the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices of IRESC SFU, engineer of the Center for Photonics and 2D Materials of Moscow Institute of Physics and Technology. The author of 14 scientific publications. Area of expertise: electromagnetic waves scattering by impedance anisotropic structures.
Address: Center for Photonics and 2D Materials of Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy Ln., Dolgoprudny, Moscow Region 141701, Russia
E-mail: pavelblagvisnyy@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-3170-2617

Igor V. Ilyin, junior researcher of the Share Scientific Center "Applied Electrodynamics and Antenna Measurements" of the IRESC SFU. The author of 27 scientific publications, obtained 24 patents. Area of expertise: general circuit design, control and automation devices on microcontrollers and microprocessors.
Address: IRESC SFU, 44 Nekrasovsky Ln., Taganrog, Rostov Region 347922, Russia
E-mail: ivi.igor@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-8585-4256

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 68–78
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 68–78

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

УДК 621.383, 621.382, 615.47 Оригинальная статья

https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-4-68-78

Метод ИК-фотометрии для измерения концентрации глюкозы в растворе для перитонеального диализа

Н. М. Жило✉, М. О. Михайлов, Е. Л. Литинская, К. В. Пожар

Национальный исследовательский университет "МИЭТ", Зеленоград, Москва, Россия

✉nikitazhilo@gmail.com

Аннотация

Введение. Переход глюкозы в кровь при перитонеальном диализе с регенерацией диализирующего раствора приводит к снижению скорости удаления излишков жидкости из организма и соответствующим нарушениям водно-солевого баланса.

Цель работы. Рассмотрена система автоматического поддержания концентрации глюкозы в диализирующем растворе, обеспечивающая эффективную ультрафильтрацию, а также предложен бесконтактный фотометрический датчик обратной связи.

Материалы и методы. Датчик представляет собой оптическую пару из лазерного ИК-диода мощностью 30 мВт с длиной волны 1600 нм, фотодиода и кварцевой трубки, через которую осуществляется циркуляция исследуемого раствора. Датчик измеряет ослабление проходящего через раствор импульсного ИК-излучения, на основании которого рассчитывается концентрация глюкозы. Подобранная комбинация цифровых фильтров обеспечивает компенсацию шумов оптической пары. Экспериментальные исследования эффективности датчика проводились на растворах для перитонеального диализа с различными концентрациями мочевины, креатинина, мочевой кислоты и глюкозы. В начале экспериментов датчик калибровался на чистом растворе.

Результаты. В результате экспериментов показано, что разработанный датчик позволяет измерять концентрацию глюкозы в растворе для перитонеального диализа в диапазоне 42...220 ммоль/л с относительной погрешностью около 15 %. Время одного измерения составляет примерно 1 мин, что позволяет получать актуальную информацию о текущей концентрации раствора.

Заключение. Указанное сочетание характеристик позволит использовать датчик в носимых аппаратах "искусственная почка" для оценки содержания глюкозы в растворе, расчета времени замены раствора и в качестве датчика обратной связи для системы поддержания концентрации осмотического агента.

Ключевые слова: ИК-фотометрия, глюкоза, перитонеальный диализ, раствор для перитонеального диализа, хроническая почечная недостаточность

Для цитирования: Метод ИК-фотометрии для измерения концентрации глюкозы в растворе для перитонеального диализа / Н. М. Жило, М. О. Михайлов, Е. Л. Литинская, К. В. Пожар // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 68–78. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-68-78

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-37-90049\20.

Статья поступила в редакцию 20.04.2021; принята к публикации после рецензирования 24.05.2021; опубликована онлайн 29.09.2021

© Жило Н. М., Михайлов М. О., Литинская Е. Л., Пожар К. В., 2021

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

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 68–78
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 68–78

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

Original article

IR-Photometry Method for Measuring Glucose Concentration in Peritoneal Dialysis Fluid

Nikita M. Zhilo✉, Mikhail O. Mikhailov, Evgeniya L. Litinskaia, Kirill V. Pozhar

[1]National Research University of Electronic Technology, Zelenograd, Moscow, Russia

✉nikitazhilo@gmail.com

Abstract

Introduction. The transition of glucose into the blood during automated peritoneal dialysis with regeneration of the dialysis fluid leads to a decreased removal of excess fluid from the body and corresponding violations of the water-salt balance.

Aim. To consider a system for automatically maintaining the concentration of glucose in the dialysate solution, which provides effective ultrafiltration, as well as to propose a non-contact photometric feedback sensor.

Materials and methods. The sensor is an optical system of an IR laser diode with a power of 30 mW and a wavelength of 1600 nm, a photodiode and a quartz tube, through which the test solution circulates. The sensor measures the attenuation of the radiation passing through the solution in a pulsed mode and calculates the glucose concentration. The selected combination of digital filters provides compensation for the noise of the optical system. Experimental studies of the efficiency of the sensor were carried out on peritoneal dialysis solutions with various concentrations of urea, creatinine, uric acid and glucose. At the beginning of the experiments, the sensor was calibrated in a pure solution.

Results. It was shown that the developed sensor makes it possible to measure the concentration of glucose in a solution for peritoneal dialysis in the range of 42...220 mmol / l with a relative error of about 15%. The time of one measurement is about 1 minute, which makes it possible to obtain up-to-date information on the current concentration of the solution.

Conclusion. This combination of characteristics will allow the sensor to be used in artificial kidney wearable devices for assessing the glucose content in the solution, calculating the time to change the solution and as a feedback sensor in a system for maintaining the concentration of the osmotic agent.

Keywords: IR-photometry, glucose, peritoneal dialysis, peritoneal dialysis solution, chronic renal failure

For citation: Zhilo N. M., Mikhailov M. O., Litinskaia E. L., Pozhar K. V. IR-Photometry Method for Measuring Glucose Concentration in Peritoneal Dialysis Fluid. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 68–78. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-68-78

Conflict of interest. The Authors have no conflicts of interest to disclose.

Source of financing. The reported study was funded by RFBR according to the research project No. 20-37-90049\20.

Submitted 20.04.2021; accepted 25.05.2021; published online 29.09.2021

Введение. Регуляция объема воды в организме является одной из наиболее важных функций метаболизма. Нарушения водно-солевого обмена (гипо- и гипергидратация), вызванные различными заболеваниями (почечной недостаточностью, сахарным диабетом, ожогами и др.), опасны для организма и требуют медицинского вмешательства. Особенно важен контроль степени гидратации пациентов с хронической почечной недостаточностью [1, 2], так как выводящая функция почек может быть сильно снижена или отсутствовать вовсе. Для замещения выделительной функции почек пациенту могут назначить перитонеальный диализ (ПД) – вливание 1…2 л раствора для перитонеального диализа (РПД) в брюшную полость, в который за счет осмоса и диффузии через капилляры брюшины переходят токсины из крови. Вывод излишков жидкости осуществляется осмотическим агентом (обычно глюкозой) в составе раствора, который обеспечивает переход воды из организма в раствор (ультрафильтрацию) [3]. Недостатком описанного подхода является малая продолжительность действия осмотического агента: спустя несколько часов из-за перехода глюкозы в кровь перенос жидкости останавливается или идет в обратном направлении, из-за чего РПД необходимо сливать и заливать свежий каждые несколько часов [4].

Решением указанной проблемы может стать система управления концентрацией осмотического агента в растворе для перитонеального диализа (рис. 1). Объектом управления ОУ является раствор для перитонеального диализа. Управляемый параметр – концентрация глюкозы $y(t)$ – измеряется датчиком обратной связи ДОС. Выходной сигнал ДОС $z(t)$ сравнивается с целевой концентрацией $g(t)$, поступающей от задающего устройства ЗУ. Полученное отклонение измеренной концентрации от заданной $e(t)$ поступает на регулятор Р, вырабатывающий управляющее воздействие $u(t)$, на основании которого исполнительное устройство ИУ – шприцевый насос с концентратом осмотического агента вводит в раствор рассчитанную дозу вещества, восстанавливающую необходимую концентрацию в ОУ. Система управления функционирует в условиях внешних воздействий $f(t)$.

Одним из самых важных узлов системы является ДОС. Он должен обладать достаточной точностью измерения, чтобы избежать перерегулирования – высокие концентрации глюкозы оказывают токсическое воздействие на брюшину и могут вызвать гипергликемию у пациента [5]. Кроме того, ДОС должен обеспечивать высокую степень изоляции раствора от внешней среды во избежание загрязнения и инфицирования раствора. Таким требованиям соответствуют датчики на основе инфракрасной фотометрии – они позволяют проводить измерения бесконтактно, при этом с точностью выше, чем у других методов (акусто- и термометрических) [6–8].

В настоящей статье описан метод и ИК-датчик для измерения концентрации глюкозы в растворе для перитонеального диализа, а также представлены результаты исследования достигнутой точности при проведении измерений на чистом РПД и модельном растворе отработанного диализата.

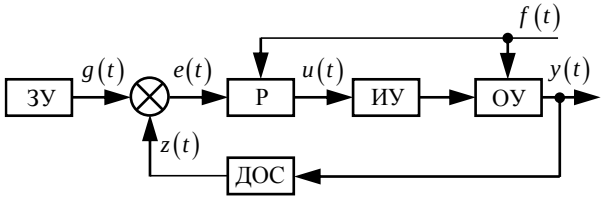


Рис. 1. Система управления концентрацией осмотического агента в растворе для перитонеального диализа

Fig. 1. Control system of the osmotic agent concentration in a solution for peritoneal dialysis

Методы. Ключевой характеристикой ИК-фотометрии является длина волны излучения λ, по измерению поглощения которого считывается концентрация искомого вещества. Пик поглощения α глюкозы находится на длине волны порядка 1600 нм, при этом поглощение излучения водой, белками и подкожным жиром относительно невелико (рис. 2) [9]. В качестве источника излучения предложено использовать ИК-лазерный диод, имеющий существенно меньшие габариты, чем другие монохроматические источники излучения, что позволяет миниатюризировать измеритель и упростить систему управления. В качестве приемника излучения выбран InGaAs-фотодиод с повышенной чувствительностью в ближнем ИК-диапазоне. Материал приемника обеспечивает более низкий шум по сравнению с диодами на основе халькогенидов свинца [10].

Для аппаратной реализации предложенного метода измерения уровня глюкозы разработан и изготовлен ДОС, представляющий собой оптическую пару из источника излучения – лазерного диода типа FB-S1600-30SOT148 (Fibercom, Россия) [11] и приемника излучения – фотодиода ДФД1000ТО-К ("Дилаз", Россия) [12]. Лазерный диод имеет мощность излучения 30 мВт, центральную длину волны 1600 нм и ширину спектра 5 нм. Фотодиод обладает спектральной чувствительностью 0.9 А/Вт, диаметром площадки 1 мм, темновым током 60 нА. Источник и приемник излучения разделены кварцевой трубкой, имеющей внешний диаметр 6.2 мм и внутренний диаметр 4 мм. Соосность лазера, фотодиода и кварцевой трубки обеспечивается конструкцией корпуса ДОС, который удерживает элементы системы на тугой посадке для предотвращения влияния вибраций на взаиморасположение.

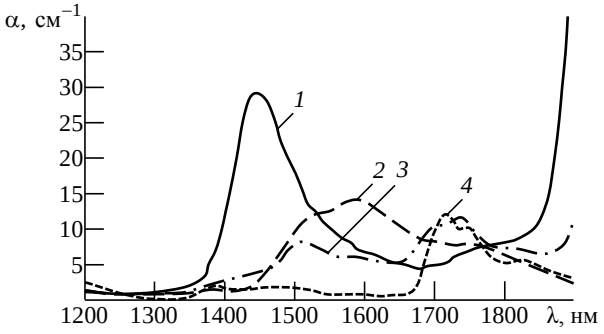


Рис. 2. Спектры поглощения воды (*1*), глюкозы (*2*), альбумина (*3*) и жира (*4*)

Fig. 2. Absorption spectra of water (*1*), glucose (*2*), albumin (*3*) and fat (*4*)

При построении расчетной модели системы измерений учтено, что излучение лазерного диода неравномерно распределено в пространстве и в разной степени ослабляется другими элементами системы в разных точках пространства. Компонентами среды являются глюкоза, вода, органические продукты метаболизма и неорганические ионы. На используемой длине волны как органические, так и неорганические компоненты диализата, за исключением воды, обладают пренебрежимо малым показателем поглощения. Рассеянием излучения, вызванным компонентами среды, можно пренебречь ввиду отсутствия в диализате клеточных структур. Тогда с использованием уравнения Бугера–Ламберта–Бера [13, 14] регистрируемый детектором поток излучения можно выразить следующим образом:

$$\Phi(t) = \int\limits_{S_\mathrm{d}} I_0(x,y)\alpha(x,y)\times \\ \times e^{-l(x,y)\left\{\mu_\mathrm{w}\left[1-\frac{c_\mathrm{gl}(t)}{\rho_\mathrm{w}}\right]+\varepsilon_\mathrm{gl}c_\mathrm{gl}(t)\right\}} dx\,dy,$$

где t – время; S_d – площадка детектора; x, y – координаты в плоскости детектора; $I_0(x,y)$ – интенсивность выходного излучения; $\alpha(x,y)$ – коэффициент ослабления излучения оптической системой (в том числе трубкой и оптическими окнами); l – длина оптического пути; μ_w – показатель поглощения воды на длине волны 1600 нм; $c_\mathrm{gl}(t)$ – концентрация глюкозы в среде; ρ_w – плотность воды; ε_gl – молярный показатель поглощения глюкозы на длине волны 1600 нм.

С учетом малости площадки фотодетектора по сравнению с радиусом кривизны трубки и отсутствием рассеяния в среде оптический путь можно считать постоянным. Тогда калибровочное значение потока на детекторе в среде с нулевой концентрацией глюкозы определяется как

$$\Phi_\mathrm{w} = \Phi(t)\big|_{c_\mathrm{gl}=0} = \int\limits_{S_D} \Phi_0(x,y)\alpha(x,y)e^{-l\mu_\mathrm{w}}dx\,dy.$$

С учетом этого уравнение для расчета мгновенного значения концентрации глюкозы по показаниям фотодиода будет иметь следующий вид:

$$c_\mathrm{gl}(t) = \frac{\ln\left[\Phi_\mathrm{w}/\Phi(t)\right]}{l\left(\varepsilon_\mathrm{gl}-\mu_\mathrm{w}/\rho_\mathrm{w}\right)}.$$

Для управления оптической парой разработана плата управления (рис. 3). Ток лазера *4* задается 12-битным ЦАП AD5624 [15] *1* через ключ *3*. Сигнал фотодиода *8* оцифровывается 16-битным АЦП AD7689 [16] *6*. Аналоговые сигналы передаются усилителями *2*, *7*. Управление и обработка сигналов, а также передача данных на ПК через USB-порт реализована на микроконтроллере STM32F103RGT6 [17] *5*. Плата смонтирована в непрозрачном светопоглощающем корпусе, в крышке которого установлен магнит, а в основании – датчик Холла. Это позволяет автоматически отключать лазер при открытой крышке для обеспечения безопасности эксплуатации измерителя.

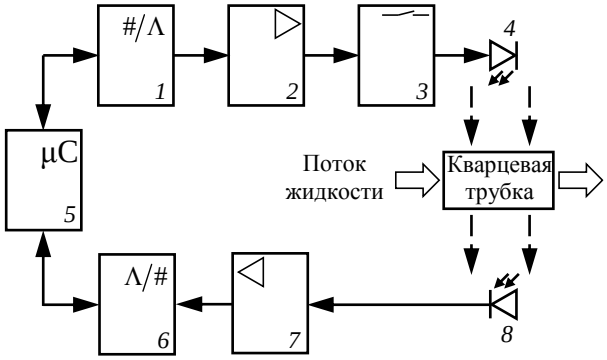


Рис. 3. Структурная схема датчика обратной связи

Fig. 3. Block diagram of the feedback sensor

Программа обмена данными с датчиком написана на языке C++ с применением фреймворка Qt. Настройки (мощность и периодичность включения лазера) передаются датчику через USB-порт компьютера. По этому же каналу принимается оцифрованный сигнал фотодиода, который выводится в виде графика и сохраняется в csv-файле.

Дальнейшая обработка сохраненных данных осуществляется в пакете MatLab. Цифровая обработка двойным фильтром скользящего среднего (ширина окна – 100 точек) при частоте дискретизации сигнала фотодиода 50 Гц позволяет сгладить шум, вызванный электромагнитными помехами и нагревом оптической пары, и при этом сохранить достаточную чувствительность. Сравнение сигналов до и после обработки приведено на рис. 4.

В ходе испытаний датчика проведены оценка точности измерения концентрации глюкозы и проверка влияния основных диализных метаболитов (мочевины, креатинина, мочевой кислоты) на результаты измерений.

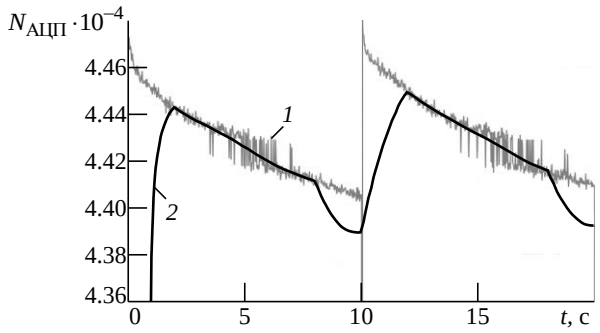


Рис. 4. Сигналы до (*1*) и после (*2*) цифровой фильтрации

Fig. 4. Signals before (*1*) and after (*2*) digital filtering

Для проведения испытаний датчика собрана экспериментальная установка (рис. 5) в составе:

– оптической пары в пластиковом корпусе 1;

– платы управления оптической парой 2;

– лабораторного источника питания 3;

– перистальтического насоса 4 для перемещения раствора через установку;

– магнитной мешалки 5 с подогревом для перемешивания и подогрева рабочего раствора;

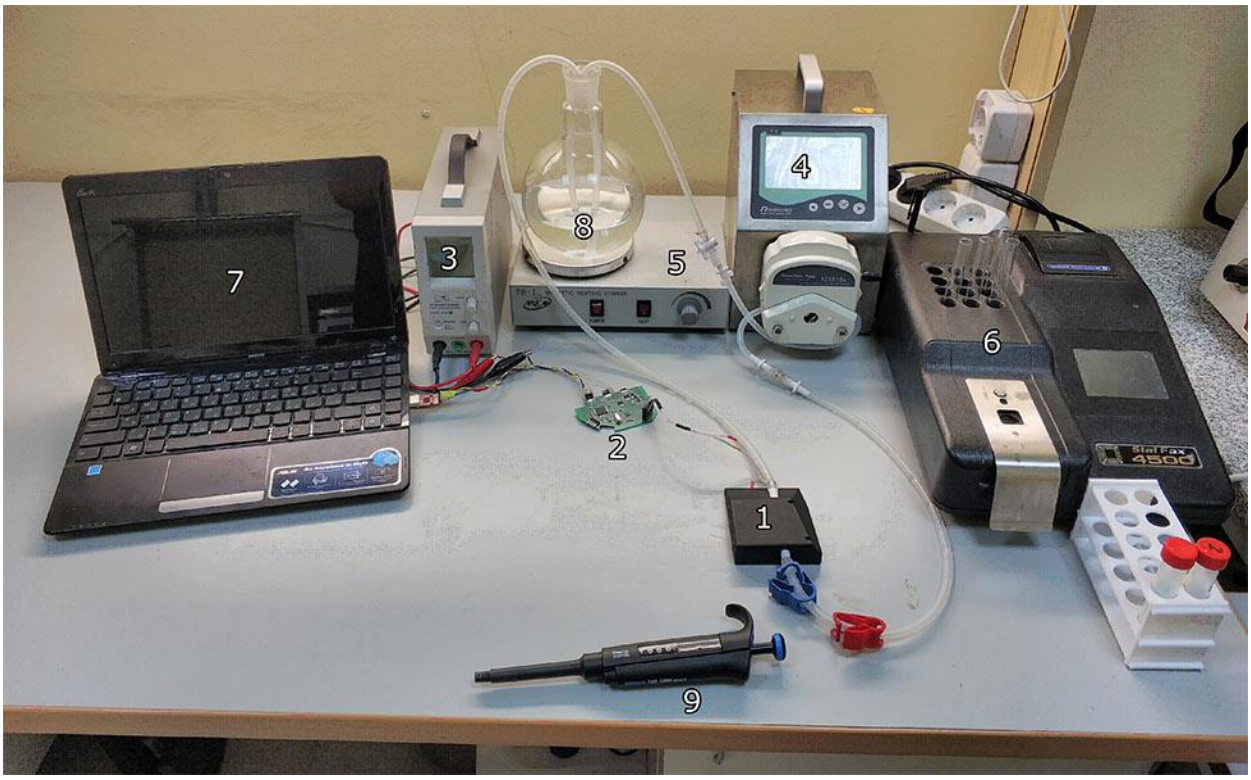
– спектрофотометра StatFax 4500 (Awareness Technology, США) 6 для измерения концентрации глюкозы в растворах;

– персонального компьютера с программным обеспечением для сбора и обработки данных и управления системой измерения 7;

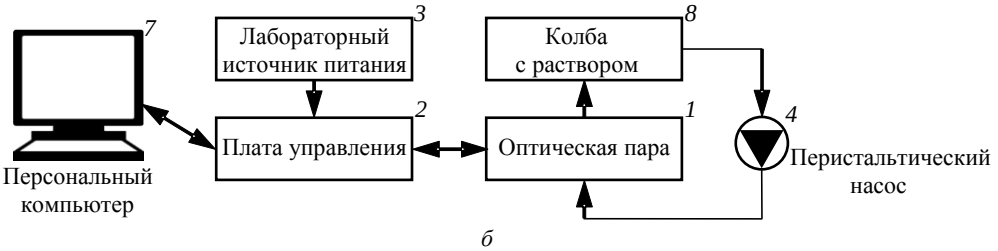
– колбы с раствором 8;

– дозатора Ленпипет 100…1000 мкл 9 и набора одноразовых наконечников для забора образцов на измерение концентрации глюкозы спектрофотометром;

– набора силиконовых трубок.



а



б

Рис. 5. Внешний вид (*а*) и схема (*б*) экспериментальной установки

Fig. 5. Appearance (*а*) and diagram (*б*) of the experimental setup

При измерениях используются:

– пакеты с раствором для перитонеального диализа Fresenius Balance;

– набор химических реактивов (глюкоза безводная, мочевина, креатинин, мочевая кислота, дистиллированная вода, реактивы Spinreact для спектрофотометра);

– электронные весы для взвешивания реактивов;

– набор пробирок и мерных цилиндров;

– секундомер.

Спектрофотометр StatFax 4500 обладает следующими параметрами: собственной погрешностью 1 % [18]; погрешностью реагентов для измерения концентрации глюкозы 2.98 % [19], мочевины 2.65 % [20], мочевой кислоты 1.20 % [21], креатинина 3.97 % [22].

Эксперимент состоял в следующем. На магнитной мешалке размещалась плоскодонная колба (рис. 5, *8*) с магнитом для размешивания. Устанавливали мощность нагрева, соответствующую примерно 37 °С в установившемся режиме, и такую скорость перемешивания, чтобы вращение раствора не приводило к подсасыванию воздуха в заборную трубку. Расход раствора на насосе устанавливали около 200 мл/мин и контролировали с помощью мерного цилиндра и секундомера. После этого трубки подключали к датчику.

В начале эксперимента датчик проходил двухступенчатую калибровку на дистиллированной воде и насыщенном растворе глюкозы. Экспериментальным путем подбиралась мощность лазера, обеспечивающая при работе на дистиллированной воде принимаемую мощность, дающую 60…90 % от полной шкалы АЦП для достижения максимального соотношения сигнал/шум, не входя при этом в режим насыщения. В описываемом эксперименте принимаемая мощность составила примерно 70 % полной шкалы АЦП. Также экспериментально подбирался такой режим работы лазера (частота и продолжительность включения), чтобы, с одной стороны, лазер вышел на квазистабильный тепловой режим, а с другой – не перегревался (для предотвращения чрезмерной флуктуации оптических характеристик). В эксперименте период включения лазера составлял 60 с, а длительность импульса 10 с.

После проведения калибровки жидкость в емкости заменялась на раствор для перитонеального диализа Fresenius Balance (объемная доля глюкозы 3.86 %) и проводились измерения. Для этого брали пробу объемом 100 мкл (для эталонного измерения на лабораторном спектрофотометре) и разбавляли раствор дистиллированной водой до получения объемной доли глюкозы 2.27, 1.36 и 0.75 %.

Для оценки влияния диализных метаболитов на работу датчика проводился аналогичный эксперимент, но в качестве рабочей жидкости использовали раствор для перитонеального диализа, в котором мочевина, креатинин и мочевая кислота были представлены в молярных концентрациях 14 ммоль/л, 346 мкмоль/л, 100 мкмоль/л соответственно, что соответствует их максимальным концентрациям в отработанном растворе для перитонеального диализа [23].

Результаты. В ходе эксперимента получены данные, позволяющие оценить точность измерений датчика относительно лабораторного спектрофотометра. На рис. 6 представлена диаграмма, отражающая показания датчика относительно лабораторного спектрофотометра в эксперименте с РПД с растворенной глюкозой. В табл. 1 представлены данные эксперимента на РПД с глюкозой, в табл. 2 – эксперимента с модельным раствором отработанного РПД. Под теоретической концентрацией понимается концентрация, определенная исходя из объема жидкости и количества глюкозы. Результаты измерений спектрофотометра названы фактической концентрацией, а полученные разработанным датчиком – измеренной.

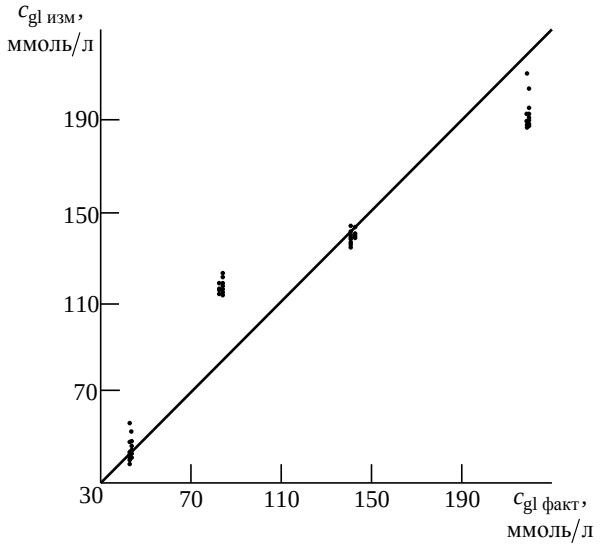


Рис. 6. Сравнение показаний датчика и лабораторного спектрофотометра на растворе РПД с глюкозой

Fig. 6. Comparison of sensor readings and laboratory spectrophotometer on a peritoneal dialysis solution with glucose

Табл. 1. Результаты измерений концентрации в РПД с глюкозой

Tabl. 1. Results of concentration measurements in peritoneal dialysis solution with glucose

Концентрация глюкозы, ммоль/л			Средняя погрешность	
теоретическая	фактическая	средняя измеренная	абсолютная, ммоль/л	относительная, %
42	43	40.4	2.6	6.0
	43.8	44.5	0.7	1.6
79	82.8	114.2	31.4	37.9
	84.4	114.3	29.9	35.4
132	141	136.9	4.1	2.9
	142.8	138.9	3.9	2.8
220	219	190.5	28.5	13.0
	220	190.6	29.7	13.5

Табл. 2. Результаты измерений концентрации в модельном растворе отработанного РПД

Tabl. 2. Results of concentration measurements in the model solution of the spent peritoneal dialysis solution

Концентрация глюкозы, ммоль/л			Средняя погрешность	
теоретическая	фактическая	средняя измеренная	абсолютная, ммоль/л	относительная, %
42	42.6	51.6	9.0	17.5
	42.8	56.9	13.1	23.0
79	81.2	118.2	37	31.3
	82.4	118.5	35.7	30.1
132	142.2	146.7	3.9	2.7
	145.2	143.6	1.6	1.1
220	219	211.7	7.3	3.4
	225	203.1	21.9	10.8

Погрешность измерения для РПД с глюкозой составила 14.6 %, для модельного раствора отработанного диализата – 12.3 %.

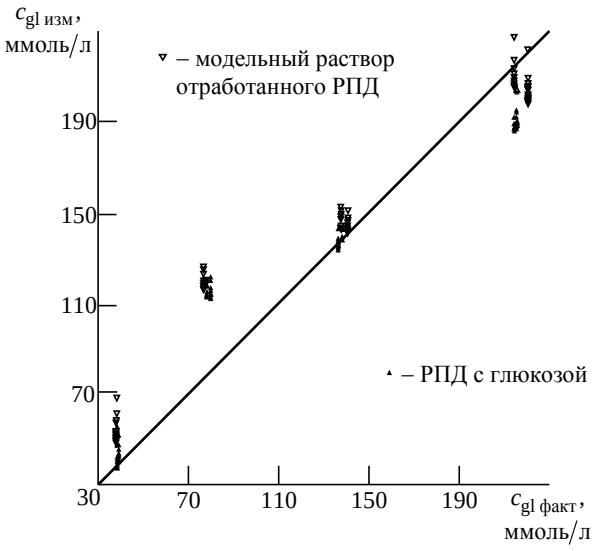


Рис. 7. Сравнение показаний датчика на РПД с глюкозой и модельном растворе отработанного диализата

Fig. 7. Comparison of sensor readings on peritoneal dialysis solution with glucose and a model solution of spent Dialysate

На рис. 7 показано сравнение измерений, проведенных на РПД с глюкозой и модельном растворе отработанного диализата. Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что основные диализные метаболиты даже в высоких концентрациях не вносят значительных искажений в измерения.

Обсуждение. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что разработанный датчик может измерять концентрацию глюкозы в РПД в диапазоне 42…220 ммоль/л с относительной погрешностью ±15 %. Время одного измерения составляет около 1 мин, что позволяет получать актуальную информацию о текущей концентрации раствора. Также показано, что мочевина, креатинин и мочевая кислота, содержащиеся в РПД, существенно не влияют на результаты измерений фотометрическим методом.

Поскольку использованные в рамках эксперимента концентрации соответствуют типичным концентрациям глюкозы в РПД, показана принципиальная возможность контроля концентрации осмотического агента при проведении непрерывного перитонеального диализа.

Погрешность измерения обусловлена в первую очередь существенным температурным дрейфом интенсивности излучения лазерного диода. Одним из наиболее перспективных способов повышения точности измерения является использование внешнего референсного фотоприемника, на который бы направлялась часть излучения с той же поляризацией, что и у главного пучка. Однако такое изменение схемы потребует увеличения габаритов датчика. В то же время такое усложнение не представляется необходимым, поскольку достигнутая погрешность измерения приемлема для практического использования.

На следующей стадии проекта планируется интегрировать разработанное устройство в качестве датчика обратной связи в систему поддержания концентрации глюкозы в растворе для перитонеального диализа. Использование такой системы позволит повысить эффективность перитонеального диализа за счет снижения частоты замены раствора, что в свою очередь увеличит безопасность процедуры [24]. Помимо этого такая система может быть интегрирована в перспективные носимые аппараты "искусственная почка" с регенерацией раствора [25, 26]. Ввод разработанной системы в аппараты позволит увеличить время между заменами раствора до 24 ч и более [27].

Заключение. Разработан проточный ИК-фотометрический датчик концентрации глюкозы в растворе для перитонеального диализа. Проведены стендовые испытания датчика, в ходе которых датчик показал общую относительную погрешность измерения 15 % для растворов с концентрацией глюкозы от 42 до 220 ммоль/л. Прибор позволяет проводить измерения как в чистых растворах для перитонеального диализа, так и на отработанном диализате с частотой одно измерение в минуту. Полученное сочетание характеристик позволит использовать датчик в носимых аппаратах "искусственная почка" для оценки содержания глюкозы в растворе, расчета времени замены раствора и в качестве датчика обратной связи для системы поддержания концентрации осмотического агента.

Авторский вклад

Жило Никита Максимович – определение цели и задачи исследования, проектирование экспериментальной установки, руководство исследованием.

Михайлов Михаил Олегович – экспериментальные исследования датчика; обработка данных.

Литинская Евгения Львовна – проектирование электрической схемы управления оптической парой и интерфейса управления.

Пожар Кирилл Витольдович – разработка математической модели для расчета концентрации глюкозы по показаниям оптической пары.

Author's contribution

Nikita M. Zhilo, defined the goals and objectives of the research, designed the experimental setup, supervised the research.

Mikhail O. Mikhailov, conducted experimental studies of the sensor and carried out data processing.

Evgeniya L. Litinskaia, designed an electrical circuit for optical system control and developed an interface for control system.

Kirill V. Pozhar, developed a mathematical model for calculating the glucose concentration based on the readings of the optical system.

Список литературы

1. Rushing J. Assessing for Dehydration in Adults // Nursing. 2009. Vol. 39, № 4. P. 14. doi: 10.1097/01.NURSE.0000348406.04065.6d

2. Hydration and Chronic Kidney Disease Progression: A Critical Review of the Evidence / W. F. Clark, J. M. Sontrop, S.-H. Huang, L. Moist, N. Bouby, L. Bankir // American J. of Nephrology. 2016. Vol. 43, № 4. P. 281–292. doi: 10.1159/000445959

3. Kinetic Modeling of Incremental Ambulatory Peritoneal Dialysis Exchanges / S. Guest, J. K. Leypoldt, M. Cassin, M. Schreiber // Peritoneal Dialysis Intern. J. of the International Society for Peritoneal Dialysis. 2017. Vol. 37, № 2. P. 205–211. doi: 10.3747/pdi.2016.00055

4. Krediet R. T. Ultrafiltration Failure Is a Reflection of Peritoneal Alterations in Patients Treated With Peritoneal Dialysis // Frontiers in Physiology. 2018. Vol. 9. Art. 1815. P. 1–6. doi: 10.3389/fphys.2018.01815

5. Dialysis-associated Hyperglycemia: Manifestations and Treatment / Y. Sun, M.-E. Roumelioti, K. Ganta, R. H. Glew, J. Gibb, D. Vigil, C. Do, K. S. Servilla, B. Wagner, J. Owen, M. Rohrscheib, R. I. Dorin, G. H. Murata, A. H. Tzamaloukas // Intern. Urology and Nephrology. 2020. Vol. 52, № 3. P. 505–517. doi: 10.1007/s11255-019-02373-1

6. Electromagnetic–Acoustic Sensing for Biomedical Applications / S. Liu, R. Zhang, Z. Zheng, Y. Zheng // Sensors. 2018. Vol. 18, № 10. Art. 3203. doi: 10.3390/s18103203

7. Evaluation of Blood Glucose Concentration Measurement using Photoacoustic Spectroscopy in Near-infrared Region / T. Namita, M. Sato, K. Kondo, M. Yamakawa, T. Shiina // Proc. of the SPIE. 2017. Vol. 10064. Art. 100645A. doi: 10.1117/12.2252532

8. Jain P., Maddila R., Joshi A. M. A precise Non-invasive Blood Glucose Measurement System using NIR Spectroscopy and Huber's Regression Model // Optical and Quantum Electronics. 2019. Vol. 51, № 2. Art. 51. doi: 10.1007/s11082-019-1766-3

9. New Methodology to Obtain a Calibration Model for Noninvasive Near-infrared Blood Glucose Monitoring / K. Maruo, T. Oota, M. Tsurugi, T. Nakagawa, H. Arimoto, M. Tamura, Y. Ozaki, Y. Yamada // Applied spectroscopy. 2006. Vol. 60, № 4. P. 441–449. doi: 10.1366/000370206776593780

10. Tan C. L., Mohseni H. Emerging Technologies for High Performance Infrared Detectors // Nanophotonics. 2018. Vol. 7, № 1. P. 169–197. doi: 10.1515/nanoph-2017-0061

11. Fibercom – High Power Laser Diodes from 905 to 1800 nm. Model FB-S1600-30SOT148. URL: https://fb-laser.com/wp-content/uploads/2021/02/FB-S1600-30SOT148.pdf (дата обращения 31.03.2021)

12. InGaAs PIN фотодиоды ДФД1000ТО-К. URL: http://www.dilas.ru/fd/dfd1000to-k.php (дата обращения 31.03.2021)

13. Пентин Ю. А., Вилков Л. В. Физические методы исследования в химии. М.: Мир, 2006. 683 с.

14. Пожар К. В. Применение метода трансмиссионной спектроскопии для неинвазивного измерения концентрации глюкозы в крови // Мед. техника. 2018. № 4. С. 22–24.

15. AD5624. 2.7 V to 5.5 V, 450 μA, Rail-to-Rail Output, Quad, 12-/16-Bit nanoDACs. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad5624_5664.pdf (дата обращения 04.04.2021)

16. AD7682. 16-Bit, 4-Channel/8-Channel, 250 kSPS PulSAR ADCs. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7682_7689.pdf (дата обращения 04.04.2021)

17. STM32F103RG. Mainstream Performance line, Arm Cortex-M3 MCU with 1 Mbyte of Flash memory, 72 MHz CPU, motor control, USB and CAN. URL: https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103rg.html (дата обращения 05.04.2021)

18. Stat Fax® 4500 Chemistry Analyzer. URL: http://crestlinescientific.com/sites/default/files/4500brochures1v3_0.pdf (дата обращения 05.04.2021)

19. Quantitative determination of glucose IVD. URL: https://www.spinreact.com/assets/files/Inserts/SERIE_SPINTECH_(TKB)/Bioquimica/TKBSIS46_GLUCOSE-LQ_2019.pdf (дата обращения 05.04.2021)

20. Quantitative determination of urea IVD. URL: https://www.spinreact.com/assets/files/Inserts/SERIE_SPINTECH_(TKB)/Bioquimica/TKBSIS47_UREA-LQ_2019.pdf (дата обращения 05.04.2021)

21. Quantitative determination of uric acid IVD. URL: https://www.spinreact.com/assets/files/Inserts/MD/BIOQUIMICA/MDBSIS45_URIC_ACID-LQ_2017.pdf (дата обращения 05.04.2021)

22. Quantitative determination of creatinine IVD. URL: https://www.spinreact.com/assets/files/Inserts/MD/BIOQUIMICA/MDBSIS13_CREATININA_2017.pdf (дата обращения 05.04.2021)

23. Scientific Aspects of Lab and Animal testing of Wearable Dialysis Equipment / N. A. Bazaev, D. V. Federyakin, E. V. Streltsov, A. V. Baklanova, N. M. Zhilo // IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), St Petersburg and Moscow, 27-30 Jan. 2020. Piscataway: IEEE, 2020. P. 2465–2468. doi: 10.1109/ElConRus49466.2020.9039179

24. Risk Factors and Prevention of Peritoneal Dialysis-Related Peritonitis / L. Gadola, C. Poggi, P. Dominguez, M. V. Poggio, E. Lungo, C. Cardozo // Peritoneal Dialysis International: J. of the Intern. Society for Peritoneal Dialysis. 2019. Vol. 39, № 2. P. 119–125. doi: 10.3747/pdi.2017.00287

25. Himmelfarb J., Ratner B. Wearable Artificial Kidney: Problems, Progress and Prospects // Nature Reviews Nephrology. 2020. Vol. 16, № 10. P. 558–559. doi: 10.1038/s41581-020-0318-1

26. Wearable Artificial Kidney and Wearable Ultrafiltration Device Vascular Access – Future Directions / A. C. Castro, M. Neri, A. Nayak Karopadi, A. Lorenzin, N. Marchionna, C. Ronco // Clinical Kidney J. 2019. Vol. 12, № 2. P. 300–307. doi: 10.1093/ckj/sfy086

27. Urea Removal Strategies for Dialysate Regeneration in a Wearable Artificial Kidney / M. K. Gelder, J. A. W. Jong, L. Folkertsma, Y. Guo, C. Blüchel, M. C. Verhaar, M. Odijk, C. F. Van Nostrum, W. E. Hennink, K. G. F. Gerritsen // Biomaterials. 2020. Vol. 234. Art. 119735. 18 p. doi: 10.1016/j.biomaterials.2019.119735

Информация об авторах

Жило Никита Максимович – магистр по специальности "Биотехнические системы и технологии" (2018), инженер Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета "МИЭТ" (НИУ МИЭТ), аспирант НИУ МИЭТ по специальности 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации (технические системы)". Автор 31 печатной работы, пяти авторских свидетельств. Сфера научных интересов – искусственные органы, заместительная почечная терапия, инсулинотерапия, биотехнические системы.
Адрес: НИУ МИЭТ, пл. Шокина, д. 1, Зеленоград, Москва, 124498, Россия
E-mail: nikitazhilo@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-7096-3377

Михайлов Михаил Олегович – бакалавр по специальности "Биотехнические системы и технологии" (2019), студент 2-го курса магистратуры НИУ МИЭТ. Автор восьми печатных работ. Сфера научных интересов – искусственные органы, биотехническая фотометрия, биотехнические системы, неинвазивное определение концентрации глюкозы в крови.
Адрес: НИУ МИЭТ, пл. Шокина, д. 1, Зеленоград, Москва, 124498, Россия
E-mail: mikhail.mikhailov1997@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-2796-9607

Литинская Евгения Львовна – магистр по специальности "Биотехнические системы и технологии" (2017), аспирант НИУ МИЭТ по специальности 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации (технические системы)". Автор 35 печатных работ, шести авторских свидетельств. Сфера научных интересов – искусственная поджелудочная железа, неинвазивное измерение глюкозы, системы управления и поддержки принятия решений, биотехнические системы.
Адрес: НИУ МИЭТ, пл. Шокина, д. 1, Зеленоград, Москва, 124498, Россия
E-mail: zheka101993@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-2300-2792

Пожар Кирилл Витольдович – кандидат технических наук (2018) по специальности "Системный анализ, управление и обработка информации (технические системы)", доцент НИУ МИЭТ. Автор 58 печатных работ, пяти авторских свидетельств. Сфера научных интересов – искусственные органы, заместительная почечная терапия, инсулинотерапия, биотехнические системы.
Адрес: НИУ МИЭТ, пл. Шокина, д. 1, Зеленоград, Москва, 124498, Россия
E-mail: pozhar@esdiar.com
https://orcid.org/0000-0001-9879-0220

References

1. Rushing J. Assessing for Dehydration in Adults. Nursing. 2009, vol. 39, no. 4, 14 p. doi: 10.1097/01.NURSE.0000348406.04065.6d

2. Clark W. F., Sontrop J. M., Huang S.-H., Moist L., Bouby N., Bankir L. Hydration and Chronic Kidney Disease Progression: A Critical Review of the Evidence. American J. of Nephrology. 2016, vol. 43, no. 4, pp. 281–292. doi: 10.1159/000445959

3. Guest S., Leypoldt J. K., Cassin M., Schreiber M. Kinetic Modeling of Incremental Ambulatory Peritoneal Dialysis Exchanges. Peritoneal Dialysis Intern. J. of the International Society for Peritoneal Dialysis. 2017, vol. 37, no. 2, pp. 205–211. doi: 10.3747/pdi.2016.00055

4. Krediet R. T. Ultrafiltration Failure Is a Reflection of Peritoneal Alterations in Patients Treated With Peritoneal Dialysis. Frontiers in Physiology. 2018, vol. 9, art. 1815, pp. 1–6. doi: 10.3389/fphys.2018.01815

5. Sun Y., Roumelioti M.-E., Ganta K., Glew R. H., Gibb J., Vigil D., Do C., Servilla K. S., Wagner B., Owen J., Rohrscheib M., Dorin R. I., Murata G. H., Tzamaloukas A. H. Dialysis-associated Hyperglycemia: Manifestations and Treatment. Intern. Urology and Nephrology. 2020, vol. 52, no. 3, pp. 505–517. doi: 10.1007/s11255-019-02373-1

6. Liu S., Zhang R., Zheng Z., Zheng Y. Electromagnetic–Acoustic Sensing for Biomedical Applications. Sensors. 2018, vol. 18, no. 10, art. 3203. doi: 10.3390/s18103203

7. Namita T., Sato M., Kondo K., Yamakawa M., Shiina T. Evaluation of Blood Glucose Concentration Measurement using Photoacoustic Spectroscopy in Near-infrared Region. Proc. of the SPIE. 2017, vol. 10064, art. 100645A. doi: 10.1117/12.2252532

8. Jain P., Maddila R., Joshi A. M. A precise Non-invasive Blood Glucose Measurement System using NIR Spectroscopy and Huber's Regression Model. Optical and Quantum Electronics. 2019, vol. 51, no. 2, art. 51. doi: 10.1007/s11082-019-1766-3

9. Maruo K., Oota T., Tsurugi M., Nakagawa T., Arimoto H., Tamura M., Ozaki Y., Yamada Y. New Methodology to Obtain a Calibration Model for Noninvasive Near-infrared Blood Glucose Monitoring. Applied spectroscopy. 2006, vol. 60, no. 4, pp. 441–449. doi: 10.1366/000370206776593780

10. Tan C. L., Mohseni H. Emerging Technologies for High Performance Infrared Detectors. Nanophotonics. 2018, vol. 7, no. 1, pp. 169–197. doi: 10.1515/nanoph-2017-0061

11. Fibercom – High Power Laser Diodes from 905 to 1800 nm. Model FB-S1600-30SOT148. Available at: https://fb-laser.com/wp-content/uploads/2021/02/FB-S1600-30SOT148.pdf (accessed 31.03.2021)

12. InGaAs PIN photodiodes DFD1000TO-K. Available at: http://www.dilas.ru/fd/dfd1000to-k.php (accessed 31.03.2021) (In Russ.)

13. Pentin Yu. A., Vilkov L. V. *Fizicheskie metody issledovaniya v khimii* [Physical research methods in chemistry]. M., Mir, 2006, 683 p (In Russ.)

14. Pozhar K. V. *Primenenie metoda transmissionnoi spektroskopii dlya neinvazivnogo izmereniya kontsentratsii glyukozy v krovi* [Transmission Spectroscopy in Noninvasive Blood Glucose Measurement]. *Meditsinskaya tekhnika*. 2018, № 4, pp. 22–24.

15. AD5624. 2.7 V to 5.5 V, 450 μA, Rail-to-Rail Output, Quad, 12-/16-Bit nanoDACs. Available at: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad5624_5664.pdf (accessed 04.04.2021)

16. AD7682. 16-Bit, 4-Channel/8-Channel, 250 kSPS PulSAR ADCs. Available at: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7682_7689.pdf (accessed 04.04.2021)

17. STM32F103RG. Mainstream Performance line, Arm Cortex-M3 MCU with 1 Mbyte of Flash memory, 72 MHz CPU, motor control, USB and CAN. Available at: https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103rg.html (accessed 05.04.2021)

18. Stat Fax® 4500 Chemistry Analyzer. Available at: http://crestlinescientific.com/sites/default/files/4500brochures1v3_0.pdf (accessed 05.04.2021)

19. Quantitative determination of glucose IVD. Available at: https://www.spinreact.com/assets/files/Inserts/SERIE_SPINTECH_(TKB)/Bioquimica/TKBSIS46_GLUCOSE-LQ_2019.pdf (accessed 05.04.2021)

20. Quantitative determination of urea IVD. Available at: https://www.spinreact.com/assets/files/Inserts/SERIE_SPINTECH_(TKB)/Bioquimica/TKBSIS47_UREA-LQ_2019.pdf (accessed 05.04.2021)

21. Quantitative determination of uric acid IVD. Available at: https://www.spinreact.com/assets/files/Inserts/MD/BIOQUIMICA/MDBSIS45_URIC_ACID-LQ_2017.pdf (accessed 05.04.2021)

22. Quantitative determination of creatinine IVD. Available at: https://www.spinreact.com/assets/files/Inserts/MD/BIOQUIMICA/MDBSIS13_CREATININA_2017.pdf (accessed 05.04.2021)

23. Bazaev N. A., Federyakin D. V., Streltsov E. V., Baklanova A. V., Zhilo N. M. Scientific Aspects of Lab and Animal testing of Wearable Dialysis Equipment. IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 27–30 Jan. 2020, St Petersburg and

Moscow. Piscataway, IEEE, 2020, pp. 2465–2468. doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039179

24. Gadola L., Poggi C., Dominguez P., Poggio M. V., Lungo E., Cardozo C. Risk Factors and Prevention of Peritoneal Dialysis-Related Peritonitis. Peritoneal Dialysis Intern. J. of the Intern. Society for Peritoneal Dialysis. 2019, vol. 39, no. 2, pp. 119–125. doi: 10.3747/pdi.2017.00287

25. Himmelfarb J., Ratner B. Wearable Artificial Kidney: Problems, Progress and Prospects. Nature Reviews Nephrology. 2020, vol. 16, no. 10, pp. 558–559. doi: 10.1038/s41581-020-0318-1

26. Castro A. C., Neri M., Nayak Karopadi A., Lorenzin A., Marchionna N., Ronco C. Wearable Artificial Kidney and Wearable Ultrafiltration Device Vascular Access – Future Directions. Clinical Kidney J. 2019, vol. 12, no. 2, pp. 300–307. doi: 10.1093/ckj/sfy086

27. Gelder M. K., Jong J. A. W., Folkertsma L., Guo Y., Blüchel C., Verhaar M. C., Odijk M., Van Nostrum C. F., Hennink W. E., Gerritsen K. G. F. Urea Removal Strategies for Dialysate Regeneration in a Wearable Artificial Kidney. Biomaterials. 2020, vol. 234, art. 119735, 18 p. doi: 10.1016/j.biomaterials.2019.119735

Information about the authors

Nikita M. Zhilo, Master of Biotechnical Systems and Technologies (2018), Engineer at the Institute of Biomedical Systems of National Research University of Electronics Technology (NRU MIET), post graduate student of NRU MIET, specialty System analysis, management and information processing (technical systems). The author of 31 scientific publications and 5 patents. Area of expertise: artificial organs, renal replacement therapy, insulin therapy, biotechnical systems.
Address: NRU MIET, 1 Shokina Sqr., Zelenograd, Moscow 124498, Russia
E-mail: nikitazhilo@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-7096-3377

Mikhail O. Mikhailov, Bachelor of Biotechnical systems and technologies (2019), 2nd year master's degree student at NRU MIET. The author of 8 scientific publications. Area of expertise: artificial organs, biotechnical photometry, biotechnical systems, non-invasive determination of blood glucose concentration.
Address: NRU MIET, 1 Shokina Sqr., Zelenograd, Moscow 124498, Russia
E-mail: mikhail.mikhailov1997@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-2796-9607

Evgeniya L. Litinskaia, Master of Biotechnical systems and technologies" (2017), post graduate student of NRU MIET, specialty System analysis, management and information processing (technical systems). The author of 35 scientific publications and 6 patents. Area of expertise: artificial pancreas, non-invasive glucose measurement, control and decision support systems, biotechnical systems.
Address: NRU MIET, 1 Shokina Sqr., Zelenograd, Moscow 124498, Russia
E-mail: zheka101993@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-2300-2792

Kirill V. Pozhar, Cand. Sci. (Eng.) (2018) on System Analysis, Management and Information Processing (Technical Systems), assistant professor at NRU MIET. The author of 58 scientific publications and 5 patents. Area of expertise: artificial organs, renal replacement therapy, insulin therapy, biotechnical systems.
Address: NRU MIET, 1 Shokina Sqr., Zelenograd, Moscow 124498, Russia
E-mail: pozhar@esdiar.com
https://orcid.org/0000-0001-9879-0220

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

УДК 615.47:616-072.7 Оригинальная статья

https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-4-79-89

Исследование погрешности оценки характеристик поздних потенциалов желудочков по 12-канальной электрокардиограмме

Ханади Солиман[1] ✉, Нгуен Чонг Туен[2]

[1] Университет Тишрин, Латакия, Сирия

[2] Технический университет имени Ле Куй Дона, Ханой, Республика Вьетнам

✉ khsoliman@stud.etu.ru

Аннотация

Введение. Поздние потенциалы желудочков являются предиктором ряда серьезных нарушений сердца, таких как синдром внезапной смерти, инфаркт миокарда, желудочковые тахиаритмии. Оценка характеристик поздних потенциалов желудочков позволяет судить о степени таких нарушений и возможных для жизни человека опасных последствиях.

Цель работы. Исследование погрешности оценки характеристик поздних потенциалов желудочков по 12-канальной электрокардиограмме (ЭКГ) высокого разрешения.

Методы и материалы. Поздние потенциалы желудочков выявляются путем определения модуля электрического вектора сердца по сигналам ортогональных отведений. Для оценки погрешности преобразования использовались синхронные записи ЭКГ-сигналов 12-канальных и ортогональных отведений, методы цифровой фильтрации для снижения уровня шумов и помех, методы выделения характерных точек QRS-комплекса и поздних потенциалов желудочков.

Результаты. Преобразование ЭКГ-сигналов 12-канальных отведений в сигналы ортогональных отведений приводит к появлению погрешностей оценки модуля электрического вектора сердца и всех показателей VLP-сигнала. Показана целесообразность использования преобразования Корса. Оно обеспечивает минимальные погрешности оценки модуля электрического вектора сердца на участке QRS-комплекса, погрешности оценки VRMS не более 0.084 %. Для оценки погрешности QRSd и LAS необходимо учитывать характер изменения VLP-сигнала и зоны неопределенности их оценки. Неоднозначность результатов оценки границ нарушений и отсутствия патологии деполяризации желудочков сердца говорит о влиянии большого количества факторов на точность результатов исследований. Погрешности их оценки могут быть причиной гипо- и гипердиагностики опасных нарушений ритма сердца, прогнозирования рисков ухудшения состояния здоровья пациента.

Заключение. Результаты исследования позволяют выделить пути снижения погрешности оценки показателей поздних потенциалов желудочков, повысить точность диагностики опасных нарушений ритма сердца и прогноза обострения заболевания из-за структурно-морфологических нарушений миокарда.

Ключевые слова: поздние потенциалы желудочков, преобразование ЭКГ-сигналов, погрешности, модуль электрического вектора сердца, оценка характеристик, гипо- и гипердиагностика, нарушения ритма сердца

Для цитирования: Ханади Солиман, Нгуен Чонг Туен. Исследование погрешности оценки характеристик поздних потенциалов желудочков по 12-канальной электрокардиограмме // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 79–89. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-79-89

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), исследовательские проекты 18-29-02036 и 19-29-01009.

Статья поступила в редакцию 21.06.2021; принята к публикации после рецензирования 26.07.2021; опубликована онлайн 29.09.2021

© Ханади Солиман, Нгуен Чонг Туен, 2021

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

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 79–89
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 79–89

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

Original article

Investigation of Inaccuracies in the Assessment of Ventricular Late Potentials Using 12-lead ECG Recordings

Hanadi Solieman[1] ✉, Nguyen Trong Tuyen[2]

[1] Tishreen University, Latakia, Syria

[2] Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

✉ khsoliman@stud.etu.ru

Abstract

Introduction. Ventricular late potentials (VLP) are predictors of cardiac disorders such as sudden death syndrome, myocardial infarction and ventricular tachyarrhythmias. Therefore, VLP assessment allows the severity and possible dangerous consequences of such disorders to be predicted.

Aim. To determine errors associated with VLP assessment by high-resolution 12-lead ECG recordings.

Materials and methods. VLPs were determined by the modulus of the cardiac electrical vector using signals from orthogonal leads. The conversion error was assessed using synchronous ECG recordings of 12-channel and orthogonal leads, the method of digital filtering (to reduce noise and interference) and the method of identifying characteristic points of the QRS complex and VLPs.

Results. The conversion of 12-lead ECG signals into orthogonal signals results in errors associated with the assessment of both the modulus of the cardiac electrical vector and all VLP indicators. The Kors transformation was shown to provide the minimum errors when assessing the cardiac electrical vector modulus in the QRS area, with the errors related to the VRMS assessment not exceeding 0.084 %. The estimation of the QRSd and LAS errors should consider the nature of VLP variations and the zone of uncertainty in their assessment. The ambiguity of the results of assessing the boundaries of violations and the absence of pathologies in cardiac ventricular depolarization indicates the influence of a large number of factors on research accuracy. Errors in the assessment of these factors may result in under- and overestimation of dangerous heart rhythm disturbances and incorrect prediction of the patient' state.

Conclusion. The obtained results can be used for reducing errors associated with the assessment of VLP indicators, improving the diagnostic accuracy of dangerous heart rhythm disturbances and predicting disease exacerbation due to structural and morphological disorders of the myocardium.

Keywords: ventricular late potentials, conversion of ECG signals, errors, cardiac electrical vector modulus, evaluation of characteristics, under- and overestimation, cardiac arrhythmias

For citation: Hanadi Solieman, Nguyen Trong Tuyen. Investigation of Inaccuracies in the Assessment of Ventricular Late Potentials Using 12-lead ECG Recordings. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 79–89. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-79-89

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

Source of financing. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), research projects No. 18-29-02036 and 19-29-01009.

Submitted 21.06.2021; accepted 26.07.2021; published online 29.09.2021

Введение. Поздние потенциалы желудочков являются предиктором ряда серьезных нарушений сердца, таких как синдром внезапной смерти, инфаркт миокарда, желудочковые тахиаритмии. Выявление и оценка их характеристик имеет большое диагностическое значение [1, 2]. Возникновение поздних потенциалов желудочков обусловлено задержкой процесса деполяризации миокарда сердца из-за нарушений проводимости проводящих путей сердца, структурно-морфологических нарушений миокарда [3]. Оценка временных и энергетических характеристик поздних потенциалов желудочков позволяет судить о степени таких нарушений и возможных для жизни человека

опасных последствиях [4]. Поэтому исследование факторов, влияющих на точность выявления поздних потенциалов и погрешности оценки характеристик, имеет большое значение для диагностики заболеваний, прогнозирования осложнений при инфаркте миокарда.

Материалы и методы. Выявляют поздние потенциалы желудочков (Ventricular Late Potential – VLP) путем определения модуля электрического вектора сердца $\mathrm{VM}(t)$ по сигналам ортогональных отведений $U_X(t), U_Y(t), U_Z(t)$ в промежутке между точками $\mathrm{QRS_{OFF}}$ и J [5]:

$$\mathrm{VM}(t) = \left[U_X^2(t) + U_Y^2(t) + U_Z^2(t)\right]^{1/2}. \quad (1)$$

Точка $\mathrm{QRS_{OFF}}$ характеризует завершение фазы сокращения стенок желудочков, точка J – полное завершение QRS-комплекса, в результате чего токи возбуждения в тканях миокарда полностью отсутствуют. Продолжительность поздних потенциалов желудочков порядка 40 мс, частотный спектр укладывается в диапазоне от 25 до 400 Гц, а амплитуда колеблется от единиц до десятков микровольт. Следует отметить, что система ортогональных отведений ЭКГ-сигнала из-за ее особенностей представлена в основном в средствах съема и мониторинга клинического назначения. В средствах съема и мониторинга, которые используются для внеклинических исследований, в том числе для скорой и неотложной медицинской помощи, используется система 12-канальных отведений ЭКГ-сигнала. Разумеется, для оперативной диагностики опасных нарушений сердца приходится использовать линейное преобразование сигналов 12-канальных отведений в сигналы ортогональных отведений. Известно несколько методов трансформации сигналов из одной системы в другую [6, 7]. Наши исследования показывают, что каждый метод преобразования вносит погрешности. Одни методы дают значительные погрешности в оценке модуля электрического вектора сердца в области предсердных сокращений миокарда, другие в области желудочковых сокращений миокарда. Выявление поздних потенциалов желудочков усложняется тем, что их амплитуда (единицы и десятки микровольт) на три порядка меньше ЭКГ-сигнала и модуля электрического вектора (единицы – десятки микровольт). Эти сигналы регистрируются на фоне сопоставимых по мощности шумов электродной системы и входного каскада дифференциального усилителя. Наличие шумов не позволяет с высокой точностью выделить точки $\mathrm{QRS_{OFF}}$ и J, так как алгоритм их выделения использует процедуру дифференцирования. Стандартная технология выделения поздних потенциалов желудочков [8], предложенная Европейской ассоциацией кардиологов, для снижения уровня шумов использует процедуру синхронного накопления сигналов и пространственного усреднения по сигналам 12 отведений. Результаты исследований VLP-сигналов на основе изучения внутрисердечных потенциалов с использованием катетеров, вводимых во внутреннюю полость желудочков, показывают, что имеют место две группы поздних потенциалов желудочков [9]. Первая группа появляется при образовании рубцов на миокарде и носит стационарный характер. Вторая группа поздних потенциалов желудочков проявляется кратковременно и периодически на ранних стадиях структурно-морфологических нарушений миокарда. Очевидно, что для регистрации этой группы поздних потенциалов желудочков метод синхронного накопления неприменим. При синхронном накоплении кардиоциклов амплитуда поздних потенциалов будет уменьшаться и станет сопоставимой с шумами электродной системы и входного усилителя (шумы $1/f$ существенно возрастают в диапазоне ниже 100 Гц). Для исследования точности выявления поздних потенциалов желудочков использовалась технология HR ECG. Применялась система регистрации ЭКГ-сигналов CardioLab фирмы General Electric, частота дискретизации ЭКГ-сигналов 12-канальных отведений составляла 1.0 кГц, амплитудное разрешение 24 бит. Электрофизиологические исследования VLP-сигналов проводились в Национальном медицинском исследовательском центре имени В. А. Алмазова [10].

Цель работы. Исследование погрешности оценки характеристик поздних потенциалов желудочков по 12-канальной электрокардиограмме HR ECG.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Выделение характерных точек ЭКГ-сигнала – R-зубца, точек Q_{ON}, QRS_{OFF} и J.

2. Преобразование ЭКГ-сигналов 12-канальных отведений в ЭКГ-сигналы ортогональных отведений и вычисление модуля электрического вектора сердца.

3. Выделение микропотенциалов желудочков на фоне значительных по амплитуде комплексов ЭКГ-сигнала.

4. Оценка характеристик поздних потенциалов желудочков, значимых для диагностики и прогнозирования состояния здоровья пациента.

5. Изучение погрешностей оценки характеристик VLP-сигналов.

Решение поставленных задач. Выделение характерных точек ЭКГ сигнала – R-зубца, точек Q_{ON}, QRS_{OFF} и J. Точка Q_{ON} на ЭКГ характеризует начало процесса деполяризации миокарда желудочков, в результате чего миокард начинает сокращение QRS_{OFF} – завершение фазы, J – окончание QRS-комплекса и переход его в ST-сегмент. Определение мощности ЭКГ-сигнала на промежутке Q_{ON}–QRS_{OFF} важно для оценки доли мощности поздних потенциалов желудочков в мощности QRS-комплекса.

Для выделения указанных точек ЭКГ-сигнала использовался канал первого отведения. Он имеет наибольшую амплитуду по сравнению с сигналами других отведений, а следовательно, и максимальное отношение сигнал/шум. Для повышения точности выделения характерных точек были использованы следующие преобразования сигнала: цифровая фильтрация с использованием фильтра Баттерворта нижних частот второго порядка с частотой среза 30 Гц, который максимально подавлял сетевую помеху 50 Гц, существенно ограничивал шумы электродной системы и входного каскада дифференциального усилителя. На втором этапе использовался фильтр верхних частот второго порядка с частотой среза 0.5 Гц. На третьем этапе выделялся R-зубец с использованием алгоритма Пана–Томпкинса. Изменение его пикового уровня осуществлялось для устранения дрейфа изолинии ЭКГ-сигнала с использованием кубического сплайна. На четвертом этапе выделялись точки Q_{ON}, QRS_{OFF} и J. Для выделения использовалось скользящее окно длительностью 40 мс, предназначенное для определения угла наклона прямой линии. Начало прямой располагалось в текущей точке нахождения скользящего окна, а конец – на расстоянии 40 мс. Фактически угол наклона представляет производную. Однако процедура дифференцирования чувствительна к шумам, а определение угла наклона, усредненного внутри скользящего окна, позволяет снизить влияние шумов. Точка Q_{ON} определяется по максимальному значению отрицательного угла наклона до R-зубца, точка QRS_{OFF} – по первому минимальному углу наклона после R-зубца, точка J – по второму после R-зубца минимальному углу наклона в скользящем окне [11]. Таким образом, рассмотренные преобразования сигналов использовались исключительно для выделения точек Q_{ON}, QRS_{OFF} и J (рис. 1) и последующей оценки характеристик VLP-сигналов, а R-зубца – для оценки динамики характеристик поздних потенциалов желудочков по кардиоциклам.

Преобразование ЭКГ-сигналов 12-канальных отведений в ЭКГ-сигналы ортогональных отведений и вычисление модуля электрического вектора сердца. Для снижения погрешностей косвенной оценки характеристик поздних потенциалов желудочков необходимо обеспечить минимальные погрешности преобразования 12-канальных ЭКГ-сигналов в ортогональные на участке желудочковых сокращений. Авторами были исследованы погрешности преобразования ЭКГ-сигналов 12-канальных отведений в сигналы ортогональных отведений с использованием преобразований: Dowers, Kors, PLSV, QLSV и различных метрик оценки погрешности [12]. Показано, что наименьшие погрешности на участке QRS-комплекса, что особенно важно для оценки характеристик VLP-сигналов, обеспечивает преобразование Kors. Основываясь на исследованиях, авторы предлагают использование регрессионного Kors-преобразования:

$$U_X(t) = a_1U_1(t) + a_2U_2(t) + \ldots + a_8U_8(t);$$
$$U_Y(t) = b_1U_1(t) + b_2U_2(t) + \ldots + b_8U_8(t);$$
$$U_Z(t) = c_1U_1(t) + c_2U_2(t) + \ldots + c_8U_8(t),$$

где сигналы $U_j\left(j=\overline{1,8}\right)$ представлены сигналами отведений I, II, V_1,V_2,V_3,V_4,V_5,V_6, а элементы матрицы a_j, b_j, c_j имеют следующие значения:

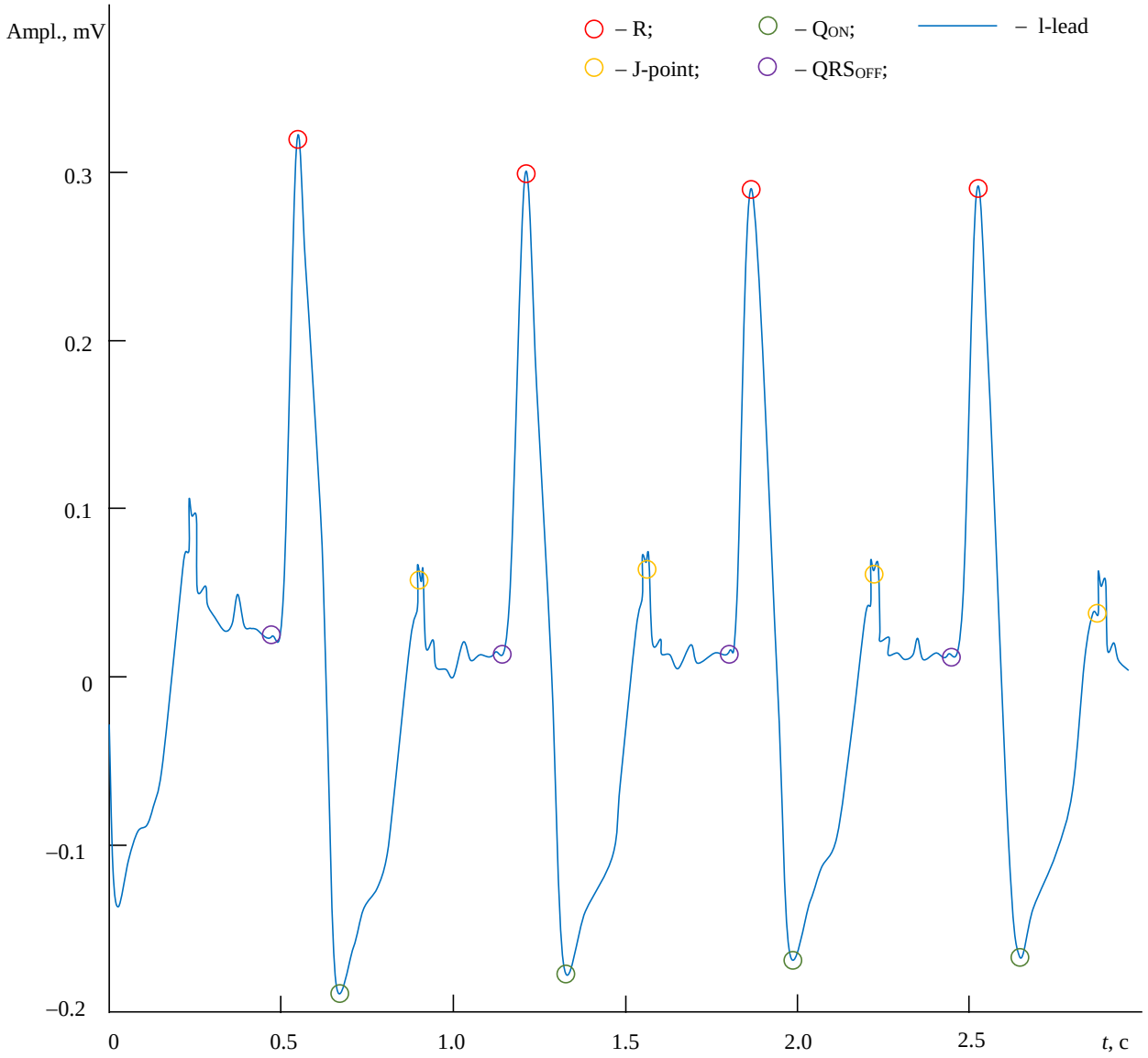


Рис. 1. Характерные точки ЭКГ-сигнала, используемые для оценки характеристик VLP

Fig. 1. Characteristic points of the ECG signal used to assess VLPs

0.13; 0.05; –0.01; 0.14; 0.06; 0.54; 0.38; –0.07;
0.06; –0.20; –0.05; 0.06; –0.17; 0.13; –0.07; 0.93;
–0.43; –0.06; –0.14; –0.20; –0.11; 0.31; 0.11; –0.23.

Модуль электрического вектора сердца выявляется в соответствии с (1). На рис. 2 отражена динамика погрешности вычисления модуля электрического вектора сердца на предсердном и желудочковом этапах сокращения миокарда.

Выделение микропотенциалов желудочков на фоне значительных по амплитуде комплексов ЭКГ-сигнала. Как было отмечено ранее, поздние потенциалы желудочков значительно меньше амплитуды QRS-комплекса и могут иметь как стационарный, так и нестационарный характер. Поэтому при синхронном накоплении ЭКГ-сигнала вторая группа поздних потенциалов желудочков будет потеряна [13]. Для выделения таких поздних потенциалов предлагаем использовать следующий метод [14]:

– на первом этапе низкочастотная фильтрация сигнала модуля электрического вектора сердца $\mathrm{VM}(t)$ фильтром Баттерворта с частотой среза 25 Гц, в результате чего из исходного сигнала $\mathrm{VM}(t)$ будут удалены поздние потенциалы желудочков;

– на втором этапе скользящее усреднение полученного сигнала в течение 10 кардиоциклов с шагом смещения окна в один кардиоцикл (этим объясняется выделение характерной точки – R-зубца);

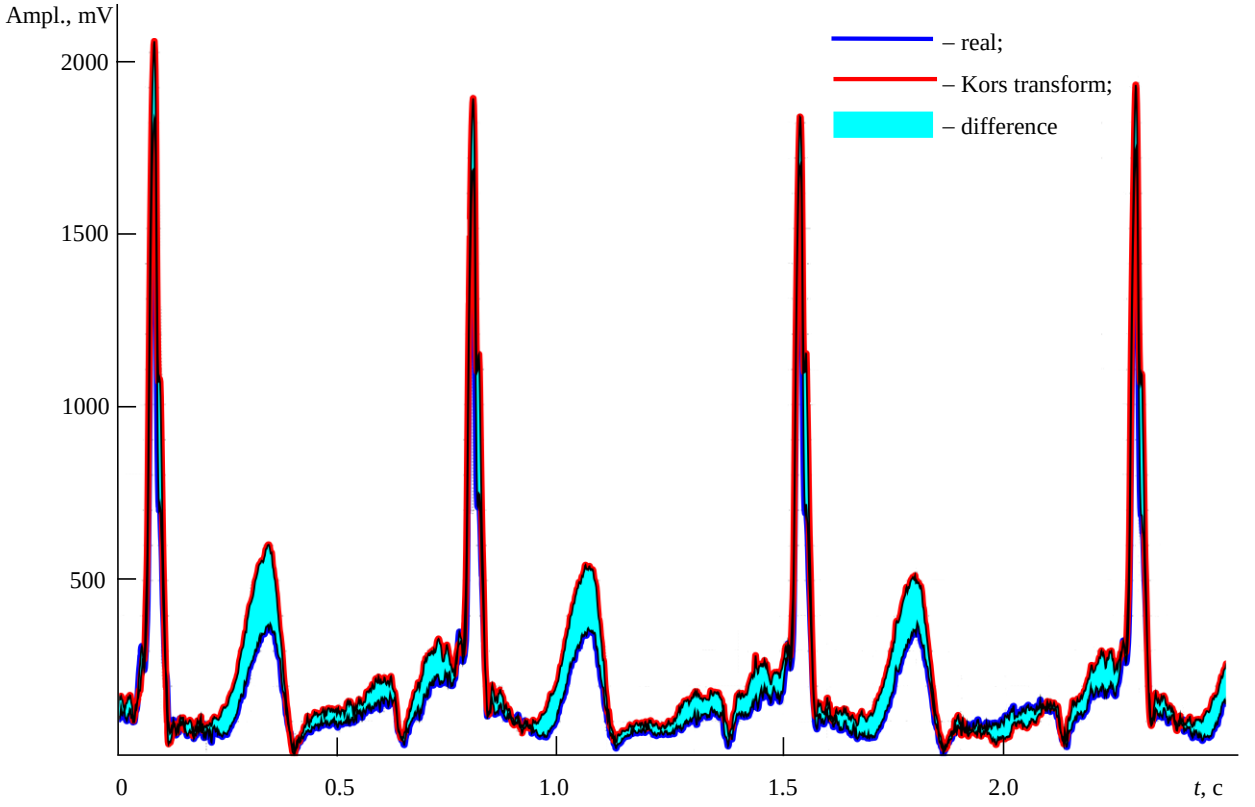


Рис. 2. Погрешности вычисления модуля электрического вектора сердца с использованием Kors-преобразования

Fig. 2. Errors when calculating the modulus of the electric heart vector using the method of Kors transformation

– на третьем этапе вычитание из текущего кардиоцикла исходного сигнала $\mathrm{VM}(t)$ усредненного сигнала $\overline{\mathrm{VM}(t)}$ и получение разностного (остаточного) сигнала $\Delta\mathrm{VM}(t)$, который не будет содержать высокоамплитудные компоненты ЭКГ-сигнала;

– на четвертом этапе выделение и анализ в каждом кардиоцикле динамики остаточного сигнала $\Delta\mathrm{VM}(t)$ между отсчетами $\mathrm{QRS_{OFF}}$ и J, а также QRS-комплекса на сигнале $\mathrm{VM}(t)$. QRS-комплекс на сигнале $\mathrm{VM}(t)$ будет иметь квазистационарный характер. Его изменение будет определяться шириной скользящего окна, в пределах которого будет формироваться сигнал $\overline{\mathrm{VM}(t)}$. При стационарном характере поздних потенциалов желудочков при просмотре в каждом кардиоцикле можно утверждать о выявлении первой группы интересующих сигналов. При изменении характеристик поздних потенциалов желудочков можно говорить о второй группе анализируемых сигналов. Эта группа поздних потенциалов желудочков может быть отражена в виде трехмерной временной диаграммы, в которой ось времени будет постепенно сдвигаться на каждый кардиоцикл (рис. 3).

Оценка характеристик поздних потенциалов желудочков, значимых для диагностики и прогнозирования состояния здоровья пациента. В клинической практике для оценки текущего состояния здоровья пациента при структурно-морфологических нарушениях миокарда желудочков используются следующие характеристики [5], [8]:

– QRSd – продолжительность QRS-комплекса от точки $\mathrm{Q_{ON}}$ до точки J;

– VRMS – среднеквадратичное напряжение последних 40 мс QRS-комплекса;

– LAS – продолжительность низкоамплитудных сигналов (менее 40 мкВ) в конце QRS-комплекса;

– $\mathrm{E_{VLP}/E_{QRS}}$ – доля энергии VLP-сигнала к энергии QRS-комплекса.

Показатель QRSd отражает наличие задержки в распространении потенциала возбуждения по проводящим путям. Чем больше зона структурно-морфологических нарушений миокарда, тем больше задержка в деполяризации миокарда сердца.

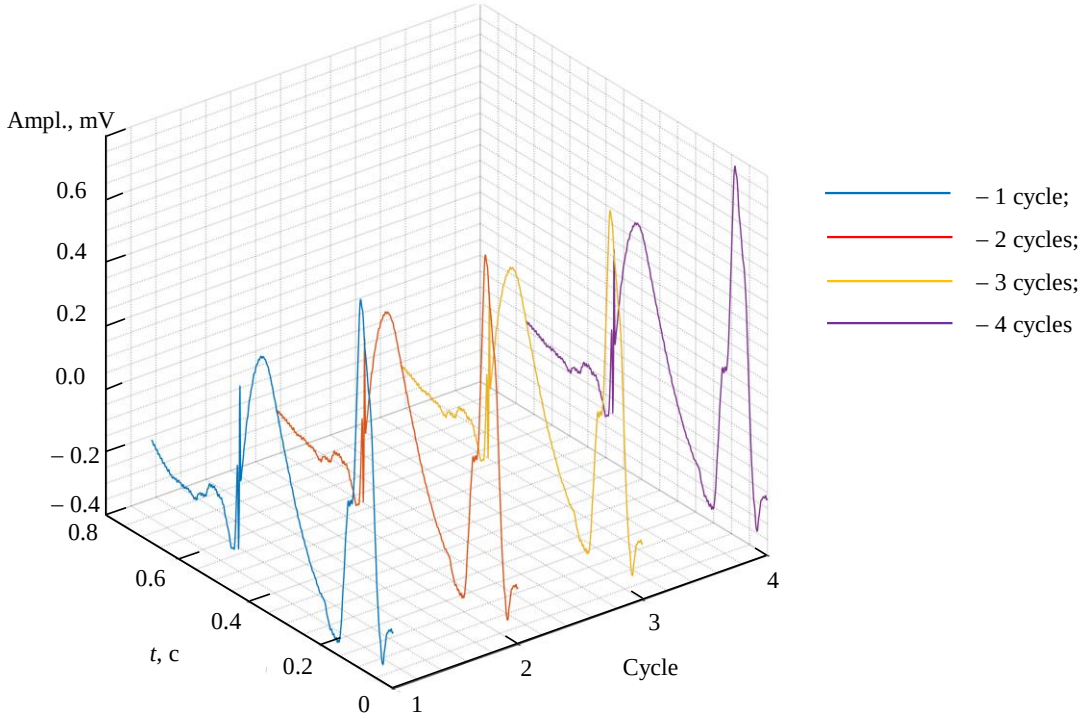


Рис. 3. Поцикловая динамика VLP-сигналов при их нестационарном характере

Fig. 3. Cyclic dynamics of the VLP signals under their non-stationary nature

Показатель VRMS отражает усредненную амплитуду поздних потенциалов желудочков, ее снижение говорит о задержке процесса деполяризации миокарда сердца.

Небольшая продолжительность LAS говорит о быстром завершении процесса деполяризации, хорошей проводимости путей в состоянии миокарда желудочков.

Показатель E_{VLP}/E_{QRS} отражает долю энергии поздних потенциалов желудочков в энергии QRS-комплекса.

Для мониторинга и прогнозирования состояния здоровья пациента большое значение имеет динамика перечисленных показателей. Увеличение QRSd, LAS и E_{VLP}/E_{QRS} и снижение VRMS говорит об ухудшении состояния сердца пациента, характер изменения каждого из перечисленных показателей отражает различные структурно-морфологические изменения в миокарде желудочков [5].

Изучение погрешностей оценки характеристик поздних потенциалов желудочков. Исследование погрешности преобразования 12-канального ЭКГ-сигнала в сигналы ортогонального отведения и вычисление модуля электрического вектора сердца с использованием преобразования Kors [12] показало, что на участке QRS-комплекса среднеквадратическая ошибка оценки амплитуды поздних потенциалов желудочков не превышает 0.013 %. Построение зоны 0.042 % отклонения от VLP-сигнала позволяет определить влияние погрешности преобразования ЭКГ-сигналов на показатели QRSd, VRMS, LAS и E_{VLP}/E_{QRS}. Очевидно, что предельная относительная погрешность оценки амплитудных характеристик, в частности VRMS, не будет превышать 0.084 %. Для оценки погрешности определения временных характеристик QRSd и LAS необходимо учитывать характер изменения VLP-сигнала. В данном случае, безусловно, надо воспользоваться определением точек пересечения графика функции модуля электрического вектора сердца с характерными точками кардиоцикла, уровня функции поздних потенциалов желудочков с уровнем амплитуды менее 40 мкВ. В соответствии с решением американской школы кардиологов следует обращать особое внимание при получении у пациента следующих показателей поздних потенциалов желудочков: fQRSd более 114 мс, LAS40 более 38 мс и VRMS40 менее 20 мкВ [15, 16]. В указанных условиях учтены в том числе и погрешности косвенной оценки показателей VLP-сигналов. Проблема влияния погрешности косвенной оценки показателей

VLP-сигналов на решение по диагностике нарушений и выбора тактики лечения всегда характеризовалась остротой. Ряд исследователей на результатах статистически представительной выборки показали целесообразность использования следующих граничных условий (таблица).

Граничное условие наличия ППЖ

The boundary condition of VLP presence

Показатель	Есть VLP	Возможно наличие	Нет VLP
QRSd, мс	> 126	113–125	< 112
VRMS, мкВ	< 13	14–21	> 22
LAS, мс	> 43	37–42	< 36

Неоднозначность граничных условий, определяющих наличие и отсутствие поздних потенциалов сердца, говорит о том, что на результаты оценки влияло множество факторов. К ним следует отнести точность фиксации электродов на теле человека, анатомические особенности расположения сердца в грудной клетке, точность совмещения координатных систем регистрации ЭКГ-сигналов, уровень шумов и помех при регистрации сигналов, особенности обработки и анализа сигналов. Тем не менее есть сопоставимые границы изменения показателей VLP-сигналов, которые можно использовать для диагностики состояния сердца и прогнозирования обострения заболевания. В процессе диагностики заболевания сердца специалисты должны понимать, что влияние различных факторов на погрешности оценки показателей поздних потенциалов сердца и разброс граничных условий могут приводить как к гипо-, так и к гипердиагностике (ошибки первого и второго рода классификации состояния), а следовательно, и к ошибкам врачебного решения по оказанию медицинской помощи. С точки зрения сохранения жизни пациента при получении показателей VLP-сигналов в зоне неопределенности «Возможно наличие» врач должен учитывать дополнительные признаки заболевания, а при их отсутствии – отдавать предпочтение в пользу гипердиагностики.

Заключение. Использование ЭКГ-сигналов 12-канального отведения для косвенной оценки поздних потенциалов желудочков всегда приводит к погрешностям оценки его показателей. Сравнительные исследования формул преобразований и оценка их среднеквадратичной погрешности выявили, что преобразование Корса обеспечивает минимальные погрешности преобразования на участке QRS-комплекса. Эти погрешности влияют на погрешности оценки показателей VLP-сигналов: QRSd, VRMS, LAS и E_{VLP}/E_{QRS} и приводят к ошибкам диагностики структурно-морфологических нарушений миокарда желудочков сердца. Оценка характеристик поздних потенциалов желудочков позволяет судить о степени таких нарушений и возможных для жизни человека опасных последствиях.

Список литературы

1. Non-invasive detection of late potentials in man: A new marker for ventricular tachycardia / G. Breithardt, R. Becker, L. Seipel, R. R. Abendroth, J. Ostermeyer // Eur Heart J. 1981. Vol. 2 (1). P. 1–11. doi: 10.1093/oxfordjournals.eurheartj.a061158

2. Олейников В. Э., Лукьянова М. В., Душина Е. В. Предикторы внезапной сердечной смерти у больных, перенесших инфаркт миокарда, определяемые при холтеровском мониторировании ЭКГ // Российский кардиологический журн. 2015. № 3 (119). С. 108–116. doi: 10.15829/1560-4071-2015-03-108-116

3. Ярченкова Л. Л. Поздние потенциалы желудочков как предикторы нарушений ритма сердца при артериальной гипертонии. Иваново: Изд-во Иван. гос. мед. акад., 2003. С. 227.

4. Латфуллин И. А., Ким З. Ф., Тептин Г. М. Поздние потенциалы желудочков // Вестн. аритмологии. 2008. № 53. С. 44–55.

5. Думпис Я. Ю., Вайнштейн А. Б., Яшин С. М. Регистрация поздних потенциалов желудочков с помощью сигнал-усредненной ЭКГ // Клиническая аритмология / под общ. ред. В. А. Ардашова. М.: Медпрактика, 2009. С. 176–194.

6. Синтез сигналов корригированных ортогональных отведений Макфи–Парунгао по данным электрокардиограммы в 12 отведениях / В. Г. Трунов, Э. А. Айду, Е. В. Блинова, Т. А. Сахнова // Мед. алфавит. Т. 1: Современная функциональная диагностика. 2017. № 14. С. 16–20.

7. Jaros R., Martinek R., Danys L. Comparison of Different Electrocardiography with Vectorcardiography Transformations // Sensors. Jul. 2019. Vol. 19, iss. 14. P. 3072. doi: 10.3390/s19143072

8. Standards for analysis of late ventricular potentials using high resolution of signal- averaged electrocardiography. A statement of task force committee between the

European society of cardiology, the American heart association and college of cardiology / G. Breithardt, M. E. Cain, N. El-Sherif, N. C. Flowers, V. Hombach, M. Janse, M. B. Simson, G. Steinbeck // Eur. Heart J. 1991. Vol. 83, iss. 4. P. 1481–1488. doi: 10.1161/01.cir.83.4.1481

9. Prediction of local abnormal ventricular myocardial electrical activation on surface ECG in patients with structural heart disease / Z. Yuldashev, A. Nemirko, E. Mikhaylov, D. Lebedev, A. Anisimov, A. Skorobogatova, D. Ripka // Proc. of the 13th Intern. Joint Conf. on Biomedical Engineering Systems and Technologies (BIOSTEC 2020). Valletta, Malta, 2020. P. 395–401. doi: 10.5220/0009374103950401

10. Processing of Synchronous Recordings of Surface ECG and Intracardiac Potentials for Diagnostics of Dangerous Heart Rate Disturbances / Z. Yuldashev, A. Nemirko, L. Manilo, E. Mikhaylov, D. Lebedev, A. Anisimov // Ural Symp. on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). Yekaterinburg, 25–26 Apr. 2019. P. 102–105. doi: 10.1109/USBEREIT.2019.8736673

11. Sadhukhan D., Mitra M. Detection of ECG Characteristic Features Using Slope Thresholding and Relative Magnitude Comparison // Third Intern. Conf. on Emerging Applications of Information Technology (EAIT-2012). Kolkata, India, 29–30 Nov. 2012. P. 122–126. doi: 10.1109/EAIT.2012.6407876

12. Solieman H., Ripka D., Yuldashev Z. M. Investigation of the Transformation Methods Accuracy of 12-Lead ECG to Orthogonal Leads Using Multiple Error Evaluation Metrics // Proc. Ural Symp. on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2021. Yekaterinburg, 13–14 May 2021. P. 70–72. doi: 10.1109/USBEREIT51232.2021.9455108

13. Guaragnella C., Rizz M., Giorgio A. Marginal Component Analysis of ECG Signals for Beat-to-Beat Detection of Ventricular Late Potentials // J. Electronics. 2019. Vol. 8(9). P. 1–15. doi: 10.3390/electronics8091000

14. Юлдашев З. М., Немирко А. П., Рипка Д. С. Алгоритм выявления нарушений электрического возбуждения миокарда желудочков по поверхностной ЭКГ // Биотехносфера. 2019. № 6. С. 21–27. doi: 10.25960/bts.2019.6.21

15. ACC Expert Consensus Document: Signal-Averaged Electrocardiography / M. E. Cain, J. L. Anderson, M. F. Arnsdorf, J. W. Mason, M. M. Scheinman, A. L. Waldo // J. of American College of Cardiology. 1996. Vol. 27(1). P. 238–249.

16. Иванов Г. Г., Сыркин А. Л. Электрокардиография высокого разрешения – теоретические предпосылки и методические аспекты использования метода // Новые методы электрокардиографии / под ред. С. В. Грачева. М.: Техносфера, 2007. С. 19–48.

Информация об авторах

Солиман Ханади – аспирантка 2-го курса, ассистент кафедры биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ассистент университета Тишрин (Сирия). В 2018 году закончила с отличием бакалавриат университета Тишрин (Сирия) по направлению "Электромеханика – мехатроника", в 2020 году закончила с отличием магистратуру СПбГЭТУ "ЛЭТИ" по направлению "Биотехнические системы и технологии". Автор 6 научных публикаций и одного патента. Сфера научных интересов – медицинское приборостроение, медицинская информатика, обработка и анализ биомедицинских сигналов и данных.
Адрес: Университет Тишрин, Южный въезд, Латакия, Сирия
E-mail: khsoliman@stud.etu.ru
https://orcid.org/0000-0002-9868-8960

Нгуен Чонг Туен – кандидат технических наук (2018) по специальности "Приборы, системы и изделия медицинского назначения", преподаватель кафедры биомедицинской инженерии Технического университета имени Ле Куй Дона (Республика Вьетнам). Окончил с отличием бакалавриат (2012) и магистратуру (2014) по направлению "Биотехнические системы и технологии". Автор более 30 научных публикаций. Сфера научных интересов – медицинское приборостроение, обработка и анализ биомедицинских сигналов и данных, телемедицинские системы диагностики.
Адрес: 236 Хоанг Куок Вьет, Ханой, Республика Вьетнам
E-mail: nguyentuyen1988@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-9408-2622)

References

1. Breithardt G., Becker R., Seipel L., Abendroth R. R., Ostermeyer J. Non-invasive detection of late potentials in man: A new marker for ventricular tachycardia. Eur Heart J. 1981, vol. 2 (1), pp. 1–11. doi: 10.1093/oxfordjournals.eurheartj.a061158

2. Oleynikov V. E., Lukianova M. V., Dushina E. V. Sudden death predictors in patients after myocardial infarction by holter ecg monitoring. Russ. J. Cardiol. 2015, no. 3 (119), pp. 108–116. doi: 10.15829/1560-4071-2015-03-108-116

3. Yarchenkova L. L. Late ventricular potentials as predictors of cardiac arrhythmias in arterial hypertension. Ivanovo*. Izd-vo Ivan. gos. akad.* 2003. P. 227.

4. Latfullin I. A., Kim Z. F., Teptin G. M. Late ventricular potentials. J. of Arrhythmology. 2008, no. 53, pp. 44–55.

5. Dumpis Ya. Yu., Vainshtein A. B., Yashin S. M. Registration of late ventricular potentials using an averaged ECG signal. Clinical arrhythmology. Ed. V. A. Ardashov. M., *Medpraktika*, 2009, pp. 176–194.

6. Trunov V. G., Aidu E. A., Blinova E. V., Sakhnova T. A. Synthesis of McFee-Parungao corrected orthogonal lead system signals from 12 lead electrocardiogram. Medical alphabet. Vol. 1. Modern functional diagnostics. 2017, no. 14, pp. 16–20.

7. Jaros R., Martinek R., Danys L. Comparison of Different Electrocardiography with Vectorcardiography Transformations. Sensors, Jul. 2019, vol. 19, iss. 14, 3072 p. doi: 10.3390/s19143072

8. Breithardt G., Cain M. E., El-Sherif N., Flowers N. C., Hombach V., Janse M., Simson M. B., Steinbeck G. Standards for analysis of late ventricular potentials using high resolution of signal- averaged electrocardiography. A statement of task force committee between the European society of cardiology, the American heart association and college of cardiology. Eur. Heart J. 1991, vol. 83, iss. 4, pp. 1481–1488. doi: 10.1161/01.cir.83.4.1481

9. Yuldashev Z., Nemirko A., Mikhaylov E., Lebedev D., Anisimov A., Skorobogatova A., Ripka D. Prediction of local abnormal ventricular myocardial electrical activation on surface ECG in patients with structural heart disease. Proc. of the 13th Intern. Joint Conf. on Biomedical Engineering Systems and Technologies (BIOSTEC 2020), Valletta, Malta. 2020, pp. 395–401. doi: 10.5220/0009374103950401

10. Yuldashev Z., Nemirko A., Manilo L., Mikhaylov E., Lebedev D., Anisimov A. Processing of Synchronous Recordings of Surface ECG and Intracardiac Potentials for Diagnostics of Dangerous Heart Rate Disturbances. Ural Symp. on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). Yekaterinburg, 25–26 Apr. 2019, pp. 102–105. doi: 10.1109/USBEREIT.2019.8736673

11. Sadhukhan D., Mitra M. Detection of ECG Characteristic Features Using Slope Thresholding and Relative Magnitude Comparison. Third Intern. Conf. on Emerging Applications of Information Technology (EAIT-2012), Kolkata, India, 29–30 Nov. 2012, pp. 122–126. doi: 10.1109/EAIT.2012.6407876

12. Solieman H., Ripka D., Yuldashev Z. M. Investigation of the Transformation Methods Accuracy of 12-Lead ECG to Orthogonal Leads Using Multiple Error Evaluation Metrics. Proc. Ural Symp. on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2021. Yekaterinburg, 13–14 May 2021, pp. 70–72. doi: 10.1109/USBEREIT51232.2021.9455108

13. Guaragnella C., Rizz M., Giorgio A. Marginal Component Analysis of ECG Signals for Beat-to-Beat Detection of Ventricular Late Potentials. J. Electronics. 2019, vol. 8(9), pp. 1–15. doi: 10.3390/electronics8091000

14. Yuldashev Z. M., NEMIRKO A. P., RIPKA D S. Detection algorithm of the abnormal ventricular myocardial electrical activation on surface ECG. *Biotechnosphera*. 2019, no. 6, pp. 21–27. doi: 10.25960/bts.2019.6.21

15. Cain M. E., Anderson J. L., Arnsdorf M. F., Mason J. W., Scheinman M. M., Waldo A. L. ACC Expert Consensus Document: Signal-Averaged Electrocardiography. J. of American College of Cardiology. 1996, vol. 27(1), pp. 238–249.

16. Ivanov G. G., Syrkin A. L. High-resolution electrocardiography-theoretical prerequisites and methodological aspects of using the method. New methods of electrocardiography. Ed. by S. V. Grachev. M., *Technosphera,* 2007, pp. 19–48.

Information about the authors

Hanadi Solieman, post-graduate student of the 2-year, assistant of the Department of Bioengineering Systems, St Petersburg Electrotechnical University, an assistant at the Mechatronics program for Distinguished at Tishreen University (Syria). In 2018, she graduated with 83.05 % from Bachelor in Electromechanics – Mechatronics at Tishreen University. In 2020, she graduated with honors from the Master's program of the Saint Petersburg Electrotechnical University in Bioengineering Systems and technologies. Systems and technologies. She is an author of 6 scientific publications and one patent. Area of expertise: medical instrumentation, medical informatics, processing and analysis of biomedical signals and data.
Address: Tishreen University, Southern Entrance, Latakia, Syria
E-mail: khsoliman@stud.etu.ru
https://orcid.org/0000-0002-9868-8960

Nguyen Trong Tuyen, Cand. Sci. (Eng.) (2018) in the field of Devices, systems, and medical products, a lecturer at the Department of Biomedical Engineering, Le Cui Don Technical University, Republic of Vietnam. Nguyet Chong Tuen graduated with honors from the Bachelor's program (2012), Master's program (2014) in the field of Bioengineering Systems and Technologies. He is the author of over 30 scientific publications. Area of expertise: medical instrumentation, processing, and analysis of biomedical signals and data, telemedicine diagnostic systems.
Address: 236 Hoang Quoc Viet, Hanoi, Republic of Vietnam
E-mail: nguyentuyen1988@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-9408-2622)

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 индентификационный 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 наноэлектроника 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 № 4 2021 Vol. 24 No. 4 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 24.09.21. Формат 60×84 1/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Уч.-изд. л. 12.35. Печ. л. 12.0. Тираж 300 экз. (1-й завод 1–150 экз.) Заказ 100.
Цена свободная.

Signed to print 24.09.21. Sheet size 60×84 1/8.
Educational-ed. liter. 12.35. Printed sheets 12.0. Number of copies 300.
Printing plant 1–150 copies. Order no. 100.
Free price.

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

ETU Publishing house
5 Prof. Popov St., St Petersburg 197376, Russia