



DOI: 10.32603/1993-8985

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

Известия высших учебных заведений России

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Том 22 № 5 2019



Journal of the Russian Universities

RADIOELECTRONICS

Vol. 22 No. 5 2019

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

2019

Saint Petersburg
ETU Publishing house

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

Индекс по каталогу «Пресса России» 45818

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

Издается 6 раз в год.

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

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

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

Редакция журнала:

197376, Санкт-Петербург,

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

Тел.: 8 (812) 234-10-13,

e-mail: radioelectronic@yandex.ru

RE.ELTECH.RU

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», оформление, 2019

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Б. А. КАЛИНИКОС, 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, Колон, США

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

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

Piotr SAMCZYNSKI, PhD, DSc, Associate Prof., Варшавский технологический университет,

Институт электронных систем, Варшава, Польша

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

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

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

Журнал выполняет следующие задачи:

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

позиций ученых России в области теории и практики радиоэлектроники;

– знакомить читателей с передовым мировым опытом внедрения научных разработок;

– привлекать перспективных молодых специалистов к научной работе в сфере радиоэлектроники;

– информировать читателей о проведении симпозиумов, конференций и семинаров в области радиоэлектроники



Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0



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

Registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (PI № FS77-74297 from 09.11.2018).

Subscription index in "Press of Russia" catalogue is 45818

Founder and publisher: Saint Petersburg Electrotechnical University (ETU)

Founded in 1998. Issued 6 times a year.

The journal is included in RSCI (Web of Science platform), Ulrichsweb Global Serials Director, Bielefeld Academic Search Engine, Google Scholar, Library of Congress, Research4Life, ResearchBib, WorldCat, The Lens, OpenAIRE.

The journal is indexed and archived in the Russian science citation index (RSCI).

The journal complies with the Budapest Open Access Initiative Declaration, is a member of the Directory of Open Access Journals (DOAJ) and Crossref.

Editorial address:

ETU, 5 Prof. Popov Str., St Petersburg 197376, Russia

Tel.: +7 (812) 234-10-13

E-mail: radioelectronic@yandex.ru **RE.ELTECH.RU**

© ETU, design, 2019

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF

Boris A. KALINIKOS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

CHAIRMAN OF THE EDITORIAL BOARD

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

EDITORIAL BOARD:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Piotr SAMCZYNSKI, PhD, DSc, Associate Professor, Warsaw University of Technology, Institute of Electronic Systems, Warsaw, Poland

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

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

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

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

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

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

Aleksey G. 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

Vladislav A. MEYEV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

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

Key Objectives:

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

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



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

СОДЕРЖАНИЕ

Оригинальные статьи

Телевидение и обработка изображений

Зубов И. Г. Метод автоматической сегментации транспортных средств на изображении.....6

Электродинамика, микроволновая техника, антенны

Можаровский А. В., Сойкин О. В., Артеменко А. А., Масленников Р. О., Вендик И. Б.
Широкополосный волноводно-микрорезонаторный переход зондового типа миллиметрового
диапазона длин волн17

Александрин А. М., Саломатов Ю. П. Экспериментальное исследование широкополосной
антенной решетки К-диапазона с использованием структур из искусственного неоднородного
диэлектрика33

Мещеряков В. В., Маркова Н. В., Юрманов П. Д. Моделирование и практическая реализация
широкополосной двухребневой рупорной антенны с шириной рабочей полосы более октавы
и высоким уровнем кроссполаризационной развязки42

Радиолокация и радионавигация

Бескостый Д. Ф., Боровиков С. Г., Ястребов Ю. В., Созонтов И. А. Использование
апостериорной информации при реализации систем радиолокационного распознавания с
применением нейросетевых технологий52

Нахмансон Г. С., Акиншин Д. С. Обнаружение траекторий движущихся прямолинейно
воздушных целей при вторичной обработке радиолокационной информации.....61

Васильев К. К., Маттис А. В., Саверкин О. В. Стробирование радиолокационных отметок
при траекторной фильтрации в связанных координатах.....71

Микро- и наноэлектроника

Айнбунд М. Р., Миронов Д. Е., Пашук А. В., Зубков В. И., Соломонов А. В.,
Забродский В. В., Николаев А. В. Кремниевая электронно-чувствительная *pin*-линейка,
облучаемая с обратной стороны.80

Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника

Dimitrov D. Tz. From Gas Sensors to Detection of Etanol Vapour to Sensor of Bacteria Detection93

Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн

Mukhin N. V., Oseev A., Kutia M. M., Borodacheva E. S., Korolev P. G. Determination
of Ethanol Content in Fuels with Phononic Crystal Sensor.....107

Лукьянов Д. П., Боронахин А. М., Шевченко С. Ю., Хиврич М. А., Амиров Т. А.
Микроакселерометр на поверхностных акустических волнах с кольцевым резонатором
на анизотропном материале116

Правила для авторов статей130

CONTENTS

Original articles

Television and Image Processing

Zubov I. G. Method for Automatic Segmentation of Vehicles in Digital Images.....6

Electrodynamics, Microwave Engineering, Antennas

Mozharovskiy A. V., Soykin O. V., Artemenko A. A., Maslennikov R. O., Vendik I. B. Wideband Waveguide-to-Microstrip Transition for mm-Wave Applications.....17

Aleksandrin A. M., Salomatov Yu. P. Experimental Study of K-Band Broadband Antenna Array Using Artificial Inhomogeneous Dielectric Structures.....33

Meshcheriakov V. V., Markova N. V., Iurmanov P. D. Modeling and Practical Implementation of a Broadband Double-Ridged Horn Antenna with an Operating Range More Than an Octave and a High Level of Cross-Polarization Discrimination.....42

Radar and Navigation

Beskostyi D. F., Borovikov S. G., Yastrebov Y. V., Sozontov I. A. Use of Aposteriori Information in the Implementation of Radar Recognition Systems Using Neural Network Technologies.52

Nakhmanson G. S., Akinshin D. S. Detection of the Trajectories of Moving Rectilinearly Air Targets in the Secondary Processing of Radar Information.....61

Vasiliev K. K., Mattis A. V., Saverkin O. V. Strobing of Radar Marks for Trajectory Filtration in a Body-Fixed Frame.....71

Micro- and Nanoelectronics

Ainbund M. R., Mironov D. E., Pashuk A. V., Zubkov V. I., Solomonov A. V., Zabrodskii V. V., Nikolaev A. V. Back-Side Electron-Bombarded Silicon *pin*-Strip.....80

Quantum, Solid-state, Plasma and Vacuum Electronics

Dimitrov D. Tz. From Gas Sensors to Detection of Etanol Vapour to Sensor of Bacteria Detection93

Instruments and Measurement Systems Based On Acoustic, Optical and Radio Waves

Mukhin N. V., Oseev A., Kutia M. M., Borodacheva E. S., Korolev P. G. Determination of Ethanol Content in Fuels with Phononic Crystal Sensor.....107

Lukyanov D. P., Boronakhin A. M., Shevchenko S. Yu., Khivrich M. A., Amirov T. A. Microaccelerometer on Surface Acoustic Waves with a Ring Resonator on Anisotropic Material.....116

Author's Guide.....130

Метод автоматической сегментации транспортных средств на изображении

И. Г. Зубов✉

ООО "НЕКСТ", Москва, Россия

✉ZubovIG@gmail.com

Аннотация

Введение. Современные системы активной безопасности транспортных средств призваны существенно снизить количество дорожно-транспортных происшествий. Датчики на основе монокулярных камер все чаще внедряются ведущими мировыми автопроизводителями как эффективный инструмент повышения безопасности движения. Современные методы локализации и классификации в совокупности с алгоритмами семантической сегментации позволяют разделить изображение на независимые группы пикселей, соответствующие каждому объекту. Тем не менее является актуальным разработка методов сегментации, обеспечивающих улучшение качества сегментации изображений.

Цель работы. Разработка автоматического метода сегментации детектированного объекта интереса на изображении.

Методы и материалы. В статье предложен автоматический метод сегментации транспортных средств на изображении. Представленный метод позволяет провести семантическую сегментацию объекта интереса на основе априорной информации о границах прямоугольника, ограничивающего объект на изображении. Информация о границах объекта используется для преобразования изображения в полярную систему координат, где пиксели изображения выступают в роли ребер взвешенного графа. С использованием алгоритма поиска кратчайшего пути и обратного преобразования в декартову систему координат вокруг объекта интереса формируется замкнутый контур.

Результаты. Проведенные эксперименты подтвердили корректность выделения объекта интереса на основе предложенного метода. Коэффициент сходства Жаккара для открытой базы изображений Carvana составил 85 %. Предложенный метод также был успешно применен к разным классам изображений базы Pascal VOC, что доказало возможность обработки объектов различных классов.

Заключение. Основной вклад предложенного метода: 1) позволяет сегментировать объект интереса на уровне современных методов сегментации, а в отдельных случаях превосходит их; 2) предоставляется новый взгляд на способ прослеживания контура объекта.

Ключевые слова: сегментация изображений, выделение области интереса, поиск кратчайшего пути в графе, алгоритм A^* ; полярная система координат

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

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Автор выражает особую благодарность выпускнику Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана Дмитрию Вадимовичу Боровому за оказанную помощь при проведении данного исследования, ценные советы и замечания.

Статья поступила в редакцию 11.07.2019; принята к публикации после рецензирования 30.09.2019; опубликована онлайн 29.11.2019

Method for Automatic Segmentation of Vehicles in Digital Images

Ilya G. Zubov✉

Ltd "Next", Moscow, Russia

✉ ZubovIG@gmail.com

Abstract

Introduction. Modern systems for active vehicle safety are designed to significantly reduce the number of road accidents. Sensors based on monocular cameras are increasingly being introduced by the world's leading automakers as an effective tool for improving traffic safety. Modern methods of localisation and classification, combined with semantic segmentation algorithms, allow for image division into independent groups of pixels corresponding to each object. However, the problem of developing segmentation algorithms ensuring improved quality of image segmentation remains to be solved.

Aim. To develop an automatic method for segmenting a given object during image analysis.

Materials and methods. An automatic method for segmenting vehicles in an image was proposed. The method presented herein allows semantic segmentation of the object of interest, based upon a priori information about the bounding boxes, which frame the objects in the image. Bounding box information is used to transform an image into a polar coordinate system where the pixels of the image act as the edges of a weighted graph. A closed contour is obtained around the object of interest by using the shortest path search algorithm and inverse transformation to the Cartesian coordinate system.

Results. The experiments confirmed the correctness of the selected area of interest based on this algorithm. Jacquard's similarity coefficient for the Carvana open database is 85 %. Furthermore, the proposed method was applied to different classes of images from the Pascal VOC database, thus demonstrating the ability to segment objects of other classes.

Conclusion. The main contribution of the proposed method was as follows: 1) segmentation of the object of interest at the level of modern methods, and in some cases in excess thereof; 2) the study presents a new look at the way of tracking object contours.

Key words: Image segmentation, selection of the region of interest; algorithm A^* ; polar coordinate system; shortest path in the graph

For citation: Zubov I. G. Method for Automatic Segmentation of Vehicles in Digital Images. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 5, pp. 6–16. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-6-16

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

Acknowledgements. The author expresses special gratitude to the graduate of Moscow State Technical University N. E. Bauman to Dmitry V. Borovoy for the assistance in conducting this study, valuable advice and comments.

Submitted 11.07.2019; accepted 30.09.2019; published online 29.11.2019

Введение. Внедрение систем технического зрения в повседневную жизнь становится все более популярным. Безопасность на дороге – одна из самых приоритетных задач. Датчики на основе монокулярных камер доказали свою эффективность в данной области. Например, система предотвращения столкновений Mobileye [1] позволяет уменьшить риск столкновения с пешеходом и иным транспортным средством (ТС), а также схода с полосы движения. К сожалению, указанная система оповещения работает лишь в светлое время суток.

Использование датчиков на основе монокулярной камеры позволяет решить большой спектр задач. Например, на основе данных о форме и площади ТС наряду с особенностями дизайна автомобиля возможно оценить размер ТС и расстояние до него. Также, применяя передовые алгоритмы классификации, детекции и сегментации дорожной сцены, учитывая возможные ограничения поведения ТС, основанные на теории движения автомобиля, возможно предсказать поведение ТС в следующий момент времени. Однако для

решения данных задач необходимо описание дорожной сцены как композиции объектов, имеющих форму, площадь, взаимное расположение.

Выигрыш в 2012 г. конкурса по классификации изображений сверточной нейросетью AlexNet, обученной А. Крижевским, И. Суткевером и Д. Хинтоном, заставил мировое сообщество по-новому взглянуть на методы анализа изображений. А. Крижевскому с коллегами удалось превзойти все классические методы компьютерного зрения, представленные в ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC) [2]. На фоне этого события, а также благодаря общедоступности цифровых камер, одним из наиболее широко развивающихся направлений в области машинного зрения стал анализ изображений на основе цветовой информации с использованием одной камеры. В настоящий момент системы, основанные на сверточных нейронных сетях, являются самыми точными в задачах классификации изображений и обнаружении объектов. С впечатляющим достижением нейронные сети были успешно применены к различным типам проблем, например [3–5].

Подавляющее большинство существующих детекторов объектов ориентировано на двумерную локализацию. Модель обнаружения 2D-объектов предоставляет информацию $(x; y; h; w)$, где $(x; y)$ – 2D-координаты центра прямоугольника, ограничивающего объект; h, w – высота и ширина объекта соответственно [3–10]. Принимая на вход изображение, детектор выдает координаты ограничивающих объекты прямоугольников и вероятности их принадлежности классам. В качестве примера на рис. 1 показаны ограничивающие прямоугольники, полученные детектором Yolo [3], вероятность нахождения транспортного средства в

которых превышает 0.5 (рис. 1, а) и 0.05 (рис. 1, б).

Для дальнейшего анализа обнаруженного объекта необходимо произвести сегментацию. Под сегментацией принято понимать разбиение изображения на множество непересекающихся связанных областей (сегментов). В процессе сегментации каждому пикселу изображения присваивается класс согласно некоторой характеристике или вычисленному свойству, например по цвету, яркости или текстуре. Результатом сегментации изображения является множество сегментов, которые вместе покрывают все изображение. Сегментация изображений позволяет перейти к описанию сцены как композиции объектов, имеющих форму, площадь, взаимное расположение, яркостные и текстурные признаки.

В настоящее время существует множество методов сегментации изображений, таких как [11–13]:

- а) выделение краев и областей: Рb-детектор краев;
- б) эвристические методы:
 - разрастания регионов (Region growing),
 - разделения и слияния регионов (Split & Merge),
 - водораздела (Watershed),
 - нормализованных разрезов графов;
- в) кластеризация по методам:
 - К-средних,
 - сдвига среднего (Mean shift) и развития;
- г) энергетические методы:
 - методы уровня,
 - турбопикселы (TurboPixels).

Метод. В настоящей статье в качестве объекта интереса рассматривается ТС. При сегментации детектированных объектов на изображении в качестве априорной информации полагаем положение прямоугольника, ограничивающего объект (рис. 2, а).

Для решения задачи сегментации ТС автором настоящей статьи разработан алгоритм обработки изображений на основе поиска кратчайшего пути



а



б

Рис. 1. Визуализация ограничивающих прямоугольников, полученных детектором объектов, при вероятности нахождения объектов в прямоугольнике более 0.5 (а) и более 0.05 (б)

Fig. 1. Visualization of bounding boxes predicted by an object detector, if the probability of finding objects in a rectangle is more than 0.5 (a) and more than 0.05 (b)



a



б

Рис. 2. Масштабирование выделенного объекта:

a – исходное изображение выделенного объекта; *б* – масштабированное изображение

Fig. 2. Scaling a selected object: *a* – the original image of the selected object; *б* – the scaled image

во взвешенном графе, представленном в полярной системе координат.

Основные шаги алгоритма.

Шаг 1. Масштабирование изображения.

Изображение масштабируется таким образом, чтобы соотношение сторон изображения составляло 1:1 (рис. 2, б). В качестве метода масштабирования используется билинейная интерполяция [14]. Масштабирование позволит центрировать полярный полюс в каждой точке (см. шаг 4).

Шаг 2. Обработка изображения оператором детектирования границ Кэнни [15]. Основные этапы этого алгоритма:

1. К изображению применяется фильтр Гаусса:

$$B = \frac{1}{159} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} \times A,$$

где *A* – матрица пикселей изображения.

2. Вычисляются проекции градиента изображения на координаты:

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \times A;$$

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times A,$$

а также направление градиента:

$$\theta = \arctg(G_y/G_x).$$

3. Полученное значение направления градиента округляется до одного из четырех углов: 0, 45, 90 и 135° [15].

4. Выделение пикселей, градиент в которых является локальным максимумом относительно

соседних пикселей. Эти пиксели считаются кандидатами на формирование границы объекта.

5. Двухпороговая фильтрация, позволяющая разбить все выделенные пиксели фрагмента изображения на три множества:

- множество пикселей, значения градиента в которых превосходит верхний порог;
- множество пикселей, значение градиента в которых меньше нижнего порога;
- множество пикселей, значения градиента в которых находятся в интервале между порогами.

Пиксели первого множества относятся к границам объекта, пиксели второго составляют неграницные области фона или объекта. Решения в отношении пикселей третьего множества принимаются в результате дальнейшей обработки.

6. Пиксели третьего множества относятся к границе объекта, если соседствуют с пикселями границ. Если же эти пиксели окружены только неграницными пикселями, они относятся к неграницным.

7. Границы окончательно определяются в результате операции их трассировки. При этом толщина границ сводится до одного пикселя, заполняются разрывы, обрабатываются ветвления границ. Трассировка осуществляется совокупным анализом окрестности каждого пикселя границы. В результате детектором Кэнни формируется окончательное представление границ объекта исходного изображения (рис. 3).

Шаг 3. Полярное преобразование. Для описания положения точки $M(x, y)$ в полярных координатах r и φ вокруг центра прямоугольника, ограничивающего детектированный объект, используют следующее преобразование:

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

$$\tg \varphi = y/x, \quad (2)$$



Рис. 3. Результат обработки объекта рис. 2, б детектором Кэнни

Fig. 3. The result of processing the object Fig. 2, б used Canny detector

где r – полюс (расстояние от точки M до начала координат); φ – угол, образованный лучом OM с полярной осью.

В качестве начала координат используется центр прямоугольника, ограничивающего детектированный объект, т. е. (1) и (2) имеют следующий вид:

$$r = \sqrt{(x + w/2)^2 + (y + h/2)^2}; \quad (3)$$

$$\tan \varphi = (2y + h)/(2x + w), \quad (4)$$

где h и w – высота и ширина ограничивающего прямоугольника соответственно.

Воспользовавшись (3) и (4), преобразуем изображение из декартовой системы координат в полярную (рис. 4). После этого преобразования контур объекта расположен в области $0 \leq \varphi < 2\pi$.

Шаг 4. Поиск кратчайшего пути во взвешенном графе. Представим изображение в виде графа, вершинами которого являются пиксели изображения в полярной системе координат. Исходя из того, что детектированный объект занимает большую часть изображения, его внешний контур будет образован пикселями, имеющими наибольшие значения радиуса. Тогда веса ребер, разделяющих два пиксела, в точке с координатами φ, r можно представить следующим образом:

$$\text{weight}(\varphi, r) = \begin{cases} r_{\max}, & \text{if } I(\varphi, r) = 0; \\ r_{\max} - r, & \text{if } I(\varphi, r) \neq 0, \end{cases}$$

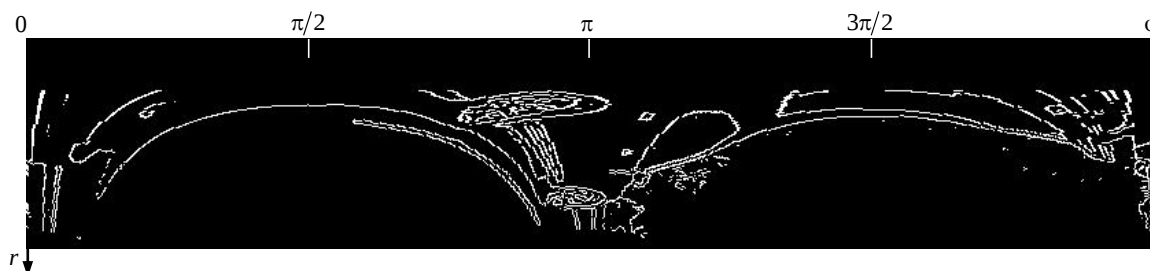


Рис. 4. Результат полярного преобразования, представленный в прямоугольной системе координат

Fig. 4. The result of a polar transformation represented in a rectangular coordinate system

где $I(\varphi, r)$ – интенсивность пиксела в точке с координатами φ, r .

Исходя из того, что внешний контур объекта расположен в области $0 \leq \varphi < 2\pi$, а веса графа зависят от значения полярного радиуса и интенсивности пикселей, задачу сегментации можно представить как поиск кратчайшего пути во взвешенном графе. Обход графа начинается с вершины $(\varphi = 0, r)$ и завершается на вершине $(\varphi = 2\pi, r)$.

Из существующего разнообразия методов, использующих теорию графов, был выбран алгоритм поиска кратчайшего пути A^* [16]. Этот алгоритм находит путь наименьшей стоимости от заданного начального до целевого узла (из одной или нескольких возможных целей). A^* следует по пути наименьших известных эвристических затрат:

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

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

На рис. 5 представлен результирующий путь с наименьшим весом, рассчитанный по алгоритму A^* для изображения с рис. 4.

Шаг 5. Преобразование полученного пути в декартову систему координат с последующей заливкой. Используя обратное преобразование выражений (3), (4), переведем полученный путь в декартову систему координат. Так как кратчайший путь, полученный на шаге 4, представляет собой замкнутый контур, описывающий объект интереса, для получения маски объекта воспользуемся заливкой области, расположенной внутри данного контура. Сопоставив маску с исходным изображением, получим сегментированное изображение (рис. 6).

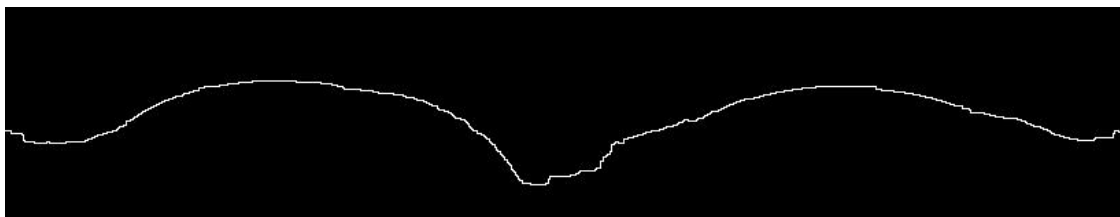


Рис. 5. Результат выделения кратчайшего пути по графу

Fig. 5. The result of selection of the shortest path through the graph



Рис. 6. Результат работы алгоритма

Fig. 6. The result of the algorithm operation

Результаты. Для оценки качества разработанного алгоритма получаемые им результаты сегментации сравнивались с результатами, даваемыми тремя распространенными методами сегментации изображения: K-Means [17], GrabCut [18] и Mask-RCNN [19].

K-Means – алгоритм кластеризации, основанный на разбиении множества элементов векторного пространства на заранее определенное число кластеров с минимизацией среднеквадратического отклонения на точках каждого кластера. На каждой итерации вычисляется центр масс для каждого кластера на основе центров, полученных на прошедшей итерации. После этого элементы

векторного пространства вновь разбиваются на кластеры в соответствии с ближайшим расстоянием до новых центров. Алгоритм завершается, если на очередной итерации центры кластеров остаются неизменными.

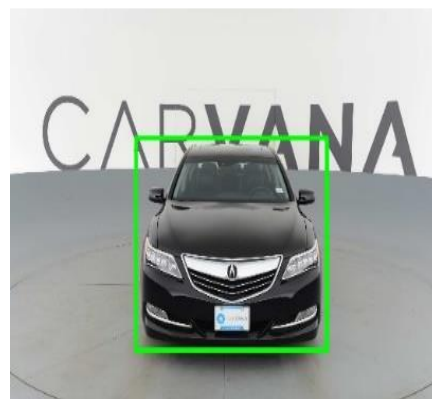
GrabCut [18] – метод сегментации изображения, основанный на алгоритме GraphCut [20]. GrabCut расширяет возможности GraphCut на обработку цветных изображений. Вначале совокупность цветов пикселей внутри и снаружи детектируемого объекта аппроксимируется смесью гауссовских величин, представляющих пиксели целевого объекта и фона. Полученная модель используется для построения марковского случайного поля с энергетической функцией, выделяющей соединенные пиксели, имеющие один и тот же класс. После чего запускается оптимизационный метод, основанный на минимальном разрезе графа.

Mask-RCNN [19] – архитектура современной нейронной сети для сегментации объектов на изображениях. Ее можно представить в виде следующих модулей:

– генератор особенностей (features extractor), формирующий трехмерную матрицу особенностей входного изображения, полученную сверточной нейронной сетью ResNet-50 [21];



а



б

Рис. 7. Предварительная обработка изображений базы Carvana:

а – исходное изображение; б – масштабированное изображение с выделенной областью объекта

Fig. 7. Preprocessing of the image of the Carava database:

а – the original image; б – the scaled image with the selected area of the object

– Region Proposal Network – сеть генерации регионов присутствия объектов;

– полносвязные слои – это сеть, которая для каждого региона вырезает из матрицы особенностей соответствующую этому региону часть и выдает класс объекта и уточненный описывающий объект прямоугольник;

– генерация бинарных масок внутри регионов присутствия объектов.

Для оценки предложенного метода и сравнения с перечисленными алгоритмами использовалась база сегментированных изображений Carvana [22], содержащая 5088 изображений ТС различных классов, а также маски для каждого изображения. Каждое изображение было масштабировано для приведения к единому количеству пикселей

500×500 (рис. 7, а). Исходя из бинарной маски изображения, выделялась прямоугольная область, в которой находится объект интереса (рис. 7, б). Изображение, заключенное внутри рамки, ограничивающей эту область, использовалось в качестве входных данных для алгоритмов сегментации.

Таблица 1. Сравнительные результаты сегментации изображений базы Carvana

Table 1. Comparative results of the segmentation of the database Carvana images

Метод сегментации/ Segmentation method	Бинарная мера сходства Жаккара/ A binary similarity measure of Jaccard, %
K-Means	0.55
GrabCut	0.68
Mask-RCNN	0.66
Предложенный метод/ Proposed method	0.85

Таблица 2. Результаты работы алгоритма сегментации детектированных транспортных средств

Table 2. The results of the algorithm for segmentation of detected vehicles

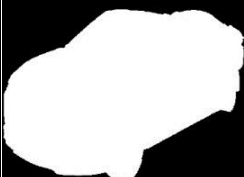
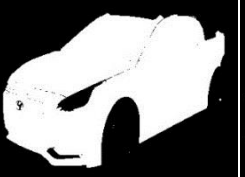
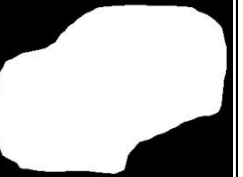
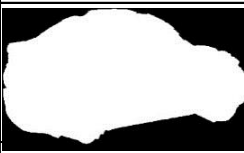
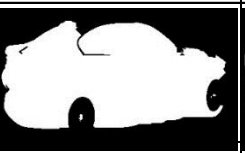
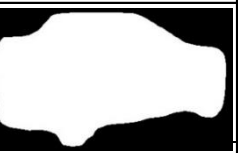
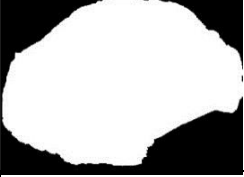
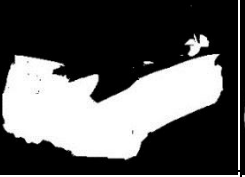
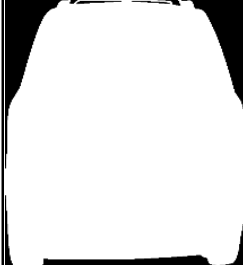
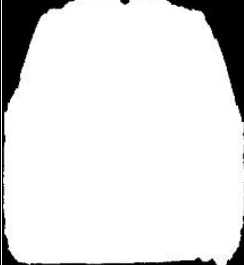
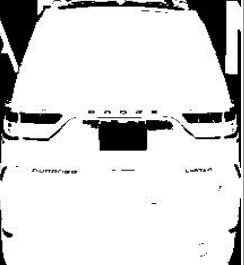
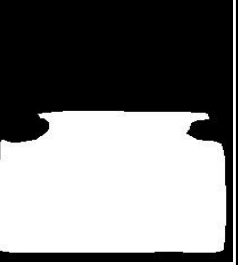
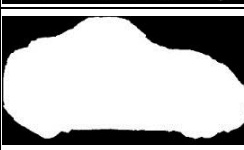
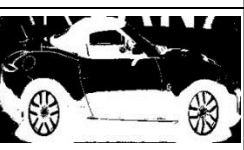
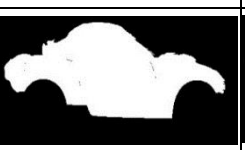
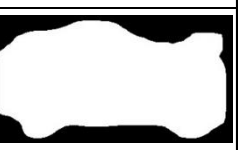
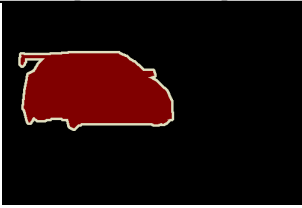
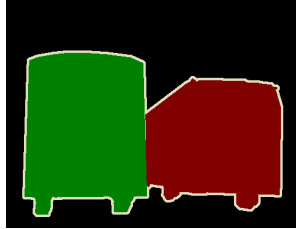
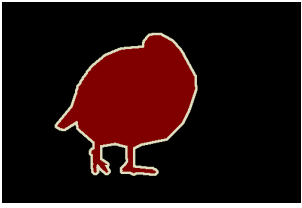
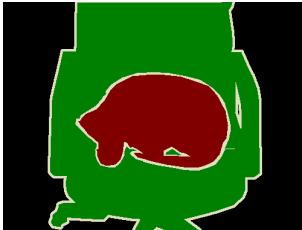
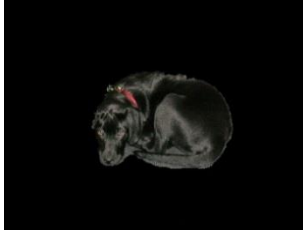
Исходная маска объекта	Предложенный метод	K-Means	GrabCut	Mask-RCNN
				
				
				
				
				
				

Таблица 3. Результат применения алгоритма к изображениям базы Pascal VOC

Table 3. The result of applying the algorithm to the images of the Pascal VOC base

Исходное изображение базы данных VOC	Сегментированное изображение	Результат работы алгоритма
		
		
		
		
		
		
		

В качестве меры сходства полученных масок сегментированных объектов использовалась бинарная мера сходства Жаккара:

$$J = |A \cap B| / |A \cup B|,$$

где A, B – бинарные маски изображения, полученного алгоритмом сегментации, и исходного

изображения соответственно.

Алгоритмы сегментации применялись ко всем изображениям базы. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Бинарные изображения, представленные в табл. 2, показывают результаты работы алгоритмов автоматической сегментации детектированных ТС.

Предложенный метод также применялся к изображениям базы Pascal VOC [23]. Изображения в табл. 3 представляют результат применения

предложенного метода к разным классам объектов на изображениях.

Вывод. В статье представлен новый метод автоматической сегментации транспортных средств на изображении. Работоспособность и конкурентоспособность метода по отношению к известным алгоритмам сегментации K-Means, GrabCat, Mask-RCNN проверены его тестированием на базе изображений Carvana. Метод, также успешно примененный к изображениям базы Pascal VOC, показал возможность сегментации объектов разных классов.

Список литературы

1. Forward Collision Warning with a Single Camera / E. Dagan, O. Mano, G. P. Stein, A. Shashua // Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symp. Parma, Italy, 14–17 June 2004. Piscataway: IEEE, 2004. P. 37–42. doi: 10.1109/IVS.2004.1336352
2. Imagenet: A Large-Scale Hierarchical Image Database / J. Deng, W. Dong, R. Socher, L.-J. Li, K. Li, L. Fei-Fei // IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition 2009. Miami, FL, USA, 20–25 June 2009. Piscataway: IEEE, 2009. P. 248–255. doi: 10.1109/CVPR.2009.5206848
3. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection / J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi. URL: <https://arxiv.org/pdf/1506.02640.pdf> (дата обращения 29.08.2019)
4. Girshick R. Fast R-CNN // IEEE Intern. Conf. on Computer Vision (ICCV), 2015. URL: <https://arxiv.org/pdf/1504.08083.pdf> (дата обращения 29.08.2019)
5. Simonyan K., Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. URL: <https://arxiv.org/pdf/1409.1556.pdf> (дата обращения 02.09.2019)
6. Object Detection with Discriminatively Trained Part Based Models / P. Felzenszwalb, R. Girshick, D. McAllester, D. Ramanan // IEEE trans. on pattern analysis and machine intelligence (PAMI). 2010. № 9. URL: <http://cs.brown.edu/people/pfelzens/papers/lsvm-pami.pdf> (дата обращения 29.08.2019)
7. Multiple Kernels for Object Detection / A. Vedaldi, V. Gulshan, M. Varma, A. Zisserman // 2009 IEEE 12th Intern. Conf. on Comp. Vision. Kyoto, Japan, 29 Sept.–2 Oct. 2009. Piscataway: IEEE, 2009. P. 606–613. doi: 10.1109/ICCV.2009.5459183
8. Viola P., Jones M. Rapid Object Detection Using a Boosted Cascade of Simple Features // CVPR, 2001. Kauai, HI, USA, 8–14 Dec. 2001. Piscataway: IEEE, 2001. URL: <https://www.cs.cmu.edu/~efros/courses/LBMV07/Papers/viola-cvpr-01.pdf> (дата обращения 27.08.2019)
9. Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation / R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, J. Malik // In Proc. of the IEEE Conf. on Comp. vision and pattern recognition. Columbus, USA, 23–28 June 2014. Piscataway: IEEE, 2014. P. 580–587. doi: 10.1109/CVPR.2014.81
10. Overfeat: Integrated Recognition, Localization and Detection Using Convolutional Networks. URL: <https://arxiv.org/pdf/1312.6229v4.pdf> (дата обращения 20.08.2019)
11. A Review of Computer Vision Segmentation Algorithms. URL <https://courses.cs.washington.edu/courses/cse576/12sp/notes/remote.pdf> (дата обращения 20.08.2019)
12. Yuheng S., Yan Hao. Image Segmentation Algorithms Overview // Computer Vision and Pattern Recognition. 2017. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1707/1707.02051.pdf> (дата обращения 20.08.2019)
13. Jyotsana M., Nirvair N. A Brief Review: Super-Pixel Based Image Segmentation Methods // Imperial J. of Interdisciplinary Research. 2016. Vol. 2, iss. 9. P. 8–12. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/4aee/70a322c01bc4dfd51c3164e480c3984b8071.pdf> (дата обращения 20.08.2019)
14. Щерба Е. В. Анализ применимости методов интерполяции и экстраполяции для решения задачи восстановления изображения // Компьютерная оптика. 2009. Т. 33, № 3. С. 336–339. URL: <http://www.computeroptics.smr.ru/KO/PDF/KO33-3/33313.pdf> (дата обращения 20.08.2019).
15. Гонсалес Р., Вудс. Р. Цифровая обработка изображений. 3-е изд. М.: Техносфера, 2012. 834 с.
16. Dechter R., Pearl J. Generalized Best-First Search Strategies and the Optimality of A* // J. of the ACM (JACM). 1985. Vol. 32, № 3. P. 505–536. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.89.3090&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения 20.08.2019)
17. Bandyopadhyay S., Maulik U. An Evolutionary Technique Based on K-Means Algorithm for Optimal Clustering in RN // Information Sciences. 2002. Vol. 146, iss. 1–4. P. 221–237. doi: 10.1016/S0020-0255(02)00208-6
18. Rother C., Kolmogorov V., Blake A. “GrabCut” – Interactive Foreground Extraction Using Iterated Graph Cuts // ACM Trans. on Graphics. 2004. Vol. 23. P. 309–314.
19. Mask R-CNN / K. He, G. Gkioxari, P. Dollar, R. Girshick // Computer Vision and Pattern Recognition. URL: <https://arxiv.org/pdf/1703.06870.pdf> (дата обращения 20.08.2019)
20. Graph cut based image segmentation with connectivity priors. URL: <https://pub.ist.ac.at/~vnk/papers/connectedGC-CVPR08.pdf> (дата обращения 28.10.2019).

21. Deep Residual Learning for Image Recognition. URL: <https://arxiv.org/pdf/1512.03385.pdf> (дата обращения 20.08.2019).

22. Carvana Image Masking Challenge. URL: <https://www.kaggle.com/c/carvana-image-masking-challenge> (дата обращения 20.08.2019)

23. The PASCAL Visual Object Classes Challenge (VOC2007). URL: <http://www.pascal-network.org/challenges/VOC/voc2007/index.html> (дата обращения 20.08.2019)

Информация об авторе

Зубов Илья Геннадьевич – магистр техники и технологий (2016), программист-алгоритмист компании ООО "НЕКСТ". Автор 4 научных публикаций. Сфера научных интересов – цифровая обработка изображений; прикладные телевизионные системы.

Адрес: ООО "НЕКСТ", ул. Рочдельская, д. 15, стр. 13, Москва, 123022, Россия

E-mail: ZubovIG@gmail.com

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

References

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

2. Deng J., Dong W., Socher R., Li L.-J., Li K., Fei-Fei L. Imagenet: A Large-Scale Hierarchical Image Database. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition 2009. Miami, FL, USA, 20–25 June 2009. Piscataway, IEEE, 2009, pp. 248–255. doi: 10.1109/CVPR.2009.5206848

3. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. 2015. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1506.02640.pdf> (accessed 29.08.2019)

4. Girshick R. Fast R-CNN. IEEE Intern. Conf. on Computer Vision (ICCV), 2015. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1504.08083.pdf> (accessed 29.08.2019)

5. Simonyan K., Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1409.1556.pdf> (accessed 02.09.2019)

6. Felzenszwalb P., Girshick R., McAllester D., Ramanan D. Object Detection with Discriminatively Trained Part Based Models. IEEE trans. on pattern analysis and machine intelligence (PAMI). 2010, no. 9. Available at: <http://cs.brown.edu/people/pfelzens/papers/lsvm-pami.pdf> (accessed 29.08.2019)

7. Vedaldi A., Gulshan V., Varma M., Zisserman A. Multiple Kernels for Object Detection. 2009 IEEE 12th Intern. Conf. on Comp. Vision. Kyoto, Japan, 29 Sept.–2 Oct. 2009. Piscataway, IEEE, 2009, pp. 606–613. doi: 10.1109/ICCV.2009.5459183

8. Viola P., Jones M. Rapid Object Detection Using a Boosted Cascade of Simple Features. CVPR, 2001. Kauai, HI, USA, 8–14 Dec. 2001. Piscataway, IEEE, 2001. Available at: <https://www.cs.cmu.edu/~efros/courses/LBMV07/Papers/viola-cvpr-01.pdf> (accessed 27.08.2019)

9. Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation. In Proc. of the IEEE Conf. on Comp. vision and

pattern recognition. Columbus, USA, 23–28 June 2014. Piscataway, IEEE, 2014, pp. 580–587. doi: 10.1109/CVPR.2014.81

10. Overfeat: Integrated Recognition, Localization and Detection Using Convolutional Networks. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1312.6229v4.pdf> (accessed 20.08.2019)

11. A Review of Computer Vision Segmentation Algorithms. Available at: <https://courses.cs.washington.edu/courses/cse576/12sp/notes/remote.pdf> (accessed 20.08.2019)

12. Yuheng S., Yan Hao. Image Segmentation Algorithms Overview. Computer Vision and Pattern Recognition. 2017. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1707/1707.02051.pdf> (accessed 20.08.2019)

13. Jyotsana M., Nirvair N. A Brief Review: Super-Pixel Based Image Segmentation Methods. Imperial J. of Interdisciplinary Research. 2016, vol. 2, iss. 9, pp. 8–12. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/4aee/70a322c01bc4dfd51c3164e480c3984b8071.pdf> (accessed 20.08.2019)

14. Shcherba E. V. Application Analysis of Interpolation and Extrapolation Methods as Used for Image Restoration. Computer Optics. 2009, vol. 33, no. 3, pp. 336–339. Available at: <http://www.computeroptics.smr.ru/KO/PDF/KO33-3/33313.pdf> (accessed 20.08.2019). (In Russ.)

15. Gonsales R., Vuds R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii* [Digital Image Processing]. Moscow, Tekhnosfera, 2012, 834 p. (In Russ.)

16. Dechter R., Pearl J. Generalized Best-First Search Strategies and the Optimality of A*. Journal of the ACM (JACM). 1985, vol. 32, no. 3, pp. 505–536. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.89.3090&rep=rep1&type=pdf> (accessed 20.08.2019)

17. Bandyopadhyay S., Maulik U. An Evolutionary Technique Based on K-Means Algorithm for Optimal Clustering in RN. Information Sciences. 2002, vol. 146, iss. 1–4, pp. 221–237. doi: 10.1016/S0020-0255(02)00208-6

18. Rother C., Kolmogorov V., Blake A. "GrabCut" - Interactive Foreground Extraction Using Iterated Graph Cuts. ACM Trans. on Graphics. 2004, vol. 23, pp. 309–314.

19. He K., Gkioxari G., Dollar P., Girshick R. Mask R-CNN. Computer Vision and Pattern Recognition. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1703.06870.pdf> (accessed 20.08.2019)

20. Graph cut based image segmentation with connectivity priors. Available at: <https://pub.ist.ac.at/~vnk/papers/connectedGC-CVPR08.pdf> (accessed 28.10.2019)

21. Deep Residual Learning for Image Recognition. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1512.03385.pdf> (accessed 20.08.2019)

22. Carvana Image Masking Challenge. Available at: <https://www.kaggle.com/c/carvana-image-masking-challenge> (accessed 20.08.2019)

23. The PASCAL Visual Object Classes Challenge (VOC2007). URL: <http://www.pascal-network.org/challenges/VOC/voc2007/index.html> (accessed 20.08.2019)

Information about the author

Ilya G. Zubov, Master of Engineering and Technology (2016), Ltd "Next" algorithm programmer. The author of 4 scientific publications. Area of expertise: digital image processing; applied television systems. Address: Ltd "Next", 15 Rochdelskaya st., bldg. 13, Moscow 123022, Russia
E-mail: ZubovIG@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0407-5651>



Книжные новинки

Кузнецов В. В., Москвин П. П.

МЕЖФАЗНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ГЕТЕРОЭПИТАКСИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ

ISBN 978-5-8114-3809-9

СПб: Лань, 2019. 376 с. : ил.

Издательство "ЛАНЬ": lan@lanbook.ru; www.lanbook.com

Магазин электронных книг Global F5: <http://globalf5.com>

В книге на основе различных приближений теории регулярных растворов и модели диффузионного массопереноса рассмотрены особенности эпитаксии твердых растворов на основе полупроводниковых соединений A^3B^5 и A^2B^6 . Проанализировано влияние упругих деформаций на смещение фазовых равновесий в многокомпонентных системах. Изложены методики расчета равновесных и когерентных диаграмм состояния многокомпонентных систем. Дано математическое описание эффекта стабилизации периода решетки и кинетики кристаллизации многокомпонентных твердых растворов. Рассмотрены критические явления и термодинамическая устойчивость подложки в неравновесной жидкой фазе. Особое внимание уделено процессам получения изопериодических гетероструктур на основе четверных и пятерных твердых растворов, которые широко применяются в различных приборах полупроводниковой оптоэлектроники.

Широкополосный волноводно-микрополосковый переход зондового типа миллиметрового диапазона длин волн

А. В. Можаровский^{1✉}, О. В. Сойкин¹, А. А. Артеменко¹, Р. О. Масленников¹, И. Б. Вендик²

¹ООО "Радио Гигабит", Нижний Новгород, Россия

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

✉ andrey.mozharovskiy@radiogigabit.com

Аннотация

Введение. Для увеличения скорости передачи данных в современных системах беспроводной радиосвязи необходимо существенное расширение полосы частот передаваемых сигналов, что возможно за счет увеличения рабочей частоты до миллиметрового диапазона. В системах радиосвязи миллиметрового диапазона соединение пассивных элементов антенно-фидерного тракта, реализованных на металлических волноводах, и активных элементов радиочастотного тракта, имеющих интерфейс на основе микрополосковых линий, осуществляется с помощью волноводно-микрополоскового перехода (ВМПП).

Цель работы. Разработка и исследование широкополосного ВМПП для частотного диапазона 60 ГГц с низким уровнем потерь для эффективной передачи сигналов между активными элементами радиочастотного тракта и пассивными элементами антенного тракта.

Материалы и методы. Оценка влияния материала подложки и свойств металлической фольги на характеристики печатных структур и расчет характеристик разработанного перехода выполнены с помощью электродинамического моделирования в системе автоматизированного проектирования CST Microwave Studio и подтверждены результатами экспериментального исследования изготовленных образцов широкополосного волноводно-микрополоскового перехода на векторном анализаторе цепей.

Результаты. Разработанный ВМПП основан на использовании проводящего зонда, реализованного на печатной плате, закрепленной между стандартным подводным волноводом WR15 и четвертьволновой заглушкой того же сечения. Для уменьшения потерь в переходе на печатной плате выполнены сквозные неметаллизированные отверстия, симметрично расположенные вокруг зонда для уменьшения доли диэлектрика печатной платы в волноводном канале. По результатам экспериментального исследования изготовленных макетов переходов, реализованных на печатных платах, выполненных из материалов RO4350B и RT/Duroid 5880 производства компании "Rogers", было получено, что переход согласован по уровню коэффициента отражения $S_{11} < -10$ дБ в полосе частот 50...70 ГГц и обеспечивает потери на прохождение не более 0.4 и 0.7 дБ для материалов RT/Duroid 5880 и RO4350B соответственно.

Заключение. Предложенный метод снижения потерь в волноводно-микрополосковом переходе осуществляется за счет уменьшения влияния диэлектрической подложки при использовании различных СВЧ-материалов печатных плат. Это позволяет рассматривать разработанный волноводно-микрополосковый переход как перспективный для соединения различных микрополосковых и волноводных устройств миллиметрового диапазона длин волн.

Ключевые слова: миллиметровый диапазон длин волн; волноводно-микрополосковый переход; печатная плата; металлический волновод

Для цитирования: Широкополосный волноводно-микрополосковый переход зондового типа миллиметрового диапазона длин волн / А. В. Можаровский, О. В. Сойкин, А. А. Артеменко, Р. О. Масленников, И. Б. Вендик // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 5. С. 17–32. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-17-32

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 27.03.2019; принята к публикации после рецензирования 16.08.2019; опубликована онлайн 29.11.2019

© Можаровский А. В., Сойкин О. В., Артеменко А. А., Масленников Р. О., Вендик И. Б., 2019



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

Wideband Waveguide-to-Microstrip Transition for mm-Wave Applications

Andrey V. Mozharovskiy^{1✉}, Oleg V. Soykin¹, Aleksey A. Artemenko¹,
Roman O. Maslennikov¹, Irina B. Vendik²

¹LLC "Radio Gigabit", Nizhny Novgorod, Russia

²Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉andrey.mozharovskiy@radiogigabit.com

Abstract

Introduction. Increased data rate in modern communication systems can be achieved by raising the operational frequency to millimeter wave range where wide transmission bands are available. In millimeter wave communication systems, the passive components of the antenna feeding system, which are based on hollow metal waveguides, and active elements of the radiofrequency circuit, which have an interface constructed on planar printed circuit boards (PCB) are interconnected using waveguide-to-microstrip transition.

Aim. To design and investigate a high-performance wideband and low loss waveguide-to-microstrip transition dedicated to the 60 GHz frequency range applications that can provide effective transmission of signals between the active components of the radiofrequency circuit and the passive components of the antenna feeding system

Materials and methods. Full-wave electromagnetic simulations in the CST Microwave Studio software were used to estimate the impact of the substrate material and metal foil on the characteristics of printed structures and to calculate the waveguide-to-microstrip transition characteristics. The results were confirmed via experimental investigation of fabricated wideband transition samples using a vector network analyzer

Results. The probe-type transition consist of a PCB fixed between a standard WR-15 waveguide and a back-short with a simple structure and the same cross-section. The proposed transition also includes two through-holes on the PCB in the center of the transition area on either side of the probe. A significant part of the lossy PCB dielectric is removed from that area, thus providing wideband and low-loss performance of the transition without any additional matching elements. The design of the transition was adapted for implementation on the PCBs made of two popular dielectric materials RO4350B and RT/Duroid 5880. The results of full-wave simulation and experimental investigation of the designed waveguide to microstrip transition are presented. The transmission bandwidth for reflection coefficient $S_{11} < -10$ dB is in excess of 50...70 GHz. The measured insertion loss for a single transition is 0.4 and 0.7 dB relatively for transitions based on RO4350B and RT/Duroid 5880.

Conclusion. The proposed method of insertion loss reduction in the waveguide-to-microstrip transition provides effective operation due to reduction of the dielectric substrate portion in the transition region for various high-frequency PCB materials. The designed waveguide-to -microstrip transition can be considered as an effective solution for interconnection between the waveguide and microstrip elements of the various millimeter-wave devices dedicated for the 60 GHz frequency range applications.

Key words: millimeter wave band; waveguide-to-microstrip transition; printed circuit board; metal waveguide

For citation: Mozharovskiy A. V., Soykin O. V., Artemenko A. A., Maslennikov R. O., Vendik I. B. Wideband Waveguide-to-Microstrip Transition for mm-Wave Applications. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 5, pp. 17–32. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-17-32

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 27.03.2019; accepted 16.08.2019; published online 29.11.2019

Введение. Одной из основных современных тенденций развития беспроводных сетей является постоянный рост объема передаваемой информации. Это связано, в первую очередь, с увеличением доли мультимедийного мобильного трафика и популярностью современных сервисов потокового видео высокого разрешения. Для удовлетворе-

ния высоких требований к пропускной способности современные системы связи должны поддерживать скорости передачи данных вплоть до единиц и даже десятков гигабит в секунду. Достижение таких скоростей возможно прежде всего за счет использования более широкой полосы частот передаваемых сигналов, а также за счет примене-

ния более эффективных способов использования спектра. К таким способам можно отнести, например, модуляции высоких порядков и реализацию систем связи на основе технологии ММО (Multiple Input Multiple Output) [1], позволяющей осуществлять одновременную параллельную передачу сразу нескольких потоков данных с использованием множества антенн, в том числе с помощью разделения потоков по поляризации.

Основной трудностью для выделения более широкой полосы частот передаваемых сигналов является перегруженность спектра в традиционных частотных диапазонах до 6 ГГц. Одним из возможных подходов к решению указанной проблемы является увеличение несущей частоты передаваемых сигналов до миллиметрового диапазона длин волн (30...300 ГГц). Этот диапазон позволяет использовать для передачи данных ряд полос шириной вплоть до нескольких гигагерц, что представляется достаточным для достижения требуемых скоростей.

Наиболее активно для разработки новых систем фиксированной радиосвязи миллиметровых (или близких к ним) диапазонов применяются диапазоны 27.5...29.5, 40.5...43.5, 57...64, 71...76/81...86 и 92...95 ГГц. При этом диапазон частот 57...64 ГГц является наиболее привлекательным для реализации систем Wi-Fi нового поколения [2], радиорелейных линий для сотовых систем связи, сетей фиксированного беспроводного доступа, а также развертывания мобильных сетей 5-го поколения (5G) [3]. Основной причиной этого является упрощенная (или полностью отсутствующая в ряде стран) процедура лицензирования частот и устройств, а также ослабленные регуляторные ограничения [4–6] ввиду нахождения внутри этого диапазона линии поглощения кислорода, что приводит к большому (вплоть до 16 дБ/км) значению затухания электромагнитной энергии при распространении [7]. Ввиду этого частотный диапазон 60 ГГц получил наибольшее развитие в локальных системах связи, предназначенных для работы на короткие расстояния до 10...20 м внутри и до 300...500 м вне помещений.

Большинство пассивных элементов систем радиосвязи миллиметрового диапазона длин волн, таких, как диплексеры, циркуляторы, поляризационные селекторы, а также внешние антенны с высоким значением коэффициента усиления, обычно выполняются на основе полых металлических волноводов или имеют волноводный интерфейс. Основным преимуществом устройств на

основе волноводов является низкий уровень потерь по сравнению с другими технологиями, а также высокая надежность, механическая стабильность, способность к передаче сигналов большой мощности и возможность интеграции с элементами корпуса системы связи. С другой стороны, подавляющее большинство активных элементов радиочастотного тракта систем связи миллиметрового диапазона, таких, как усилители мощности, маломощные усилители, смесители, фильтры и др., обычно реализуются на печатных платах и имеют интерфейс на основе микрополосковых или других планарных линий передачи. Таким образом, задача разработки широкополосного волноводно-микрополоскового перехода (ВМПП) для эффективной передачи сигналов между активными элементами радиочастотного тракта и пассивными элементами антенного тракта систем связи является актуальной. Кроме того, такой переход может быть использован для тестирования характеристик различных образцов разработанных печатных устройств или схем на основе элементов поверхностного монтажа.

С повышением рабочей частоты до миллиметрового диапазона существенно возрастают потери в печатных структурах, и уменьшение потерь при прохождении волны через переход становится важной проблемой. При этом возникает необходимость анализа влияния свойств материала диэлектрической подложки и проводящих слоев печатной платы на характеристики печатных структур, а также анализа методов уменьшения негативного влияния свойств подложки на характеристики разрабатываемого ВМПП.

Основными требованиями к разрабатываемому ВМПП являются малый уровень потерь на прохождение (менее 1 дБ) и согласование по значению коэффициента отражения $S_{11} < -10$ дБ в рассматриваемом диапазоне частот 57...64 ГГц. Поскольку ВМПП предназначен для использования в составе радиочастотного модуля системы радиосвязи, он должен быть реализован на общей многослойной печатной плате с активными элементами радиочастотного тракта. При реализации радиочастотного модуля для трассировки сигнальных линий, линий управления и питания активных компонентов, обеспечения нескольких экранирующих слоев металлизации, необходимых для изоляции цифровых и аналоговых схем, обычно используются несколько слоев металлизации печатной платы. Многослойная структура

печатной платы обеспечивает компактное расположение сосредоточенных и распределенных элементов и уменьшает общие габариты. Для подключения к волноводным компонентам антенного тракта систем связи частотного диапазона 57...64 ГГц, а также к измерительному оборудованию переход должен иметь интерфейс на основе стандартного прямоугольного волновода WR-15 с размерами сечения 3.76×1.88 мм.

С целью уменьшения потерь в переходе исследовано влияние диэлектрического материала подложки и способа изготовления медной фольги на характеристики печатных структур, реализованных на печатной плате, в том числе разработанного ВМПП.

В качестве основного варианта ВМПП выбран переход зондового типа с дополнительной волноводной заглушкой на основе закороченного отрезка регулярного волновода WR-15. Характеристики переходов исследованы методом электродинамического моделирования в системе автоматизированного проектирования (САПР) CST Microwave Studio и подтверждены при измерении тестовых макетов.

Влияние материала подложки и свойств металлической фольги на характеристики печатных структур. Свойства переходов и особенности технологии существенно зависят от свойств используемых материалов. Потери, возникающие в линиях передачи на печатных платах, можно по природе возникновения разделить на потери в проводниках и потери в диэлектрической подложке.

Потери в проводниках обусловлены несколькими основными причинами. Первая из них – конечная электрическая проводимость металлической фольги, используемой при производстве печатных плат. Объемная плотность тока максимальна у поверхности проводника и экспоненциально убывает при удалении от поверхности. Глубина, на которой объемная плотность тока уменьшается в e раз, известная как толщина скин-слоя, определяется выражением

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}},$$

где f – частота; σ – электрическая проводимость; μ – магнитная проницаемость проводника. С ростом частоты толщина скин-слоя уменьшается, что приводит к увеличению плотности тока в приповерхностном слое проводника, а следова-

тельно, к значительному росту активного сопротивления проводника и к увеличению погонных потерь. Так с ростом частоты сигнала от 1 до 60 ГГц толщина скин-слоя медного проводника уменьшается с 2.1 до 0.27 мкм. Очевидно, что при столь малой толщине скин-слоя в миллиметровом диапазоне длин волн поверхностные неоднородности, вызванные особенностями производства медной фольги, становятся сопоставимыми с ним по размеру, что существенно влияет на погонные потери в проводниках.

Обычно выделяют 2 типа фольги, применяемой для производства печатных плат: катаная и электролитически осажденная. Катаную медную фольгу получают из толстой медной заготовки посредством последовательных холодных прокатов вплоть до достижения нужной толщины [8]. Гладкость поверхности фольги, обычно описываемая среднеквадратическим отклонением (СКО) зернистости, в этом случае зависит от характеристик прокатного станка и обычно составляет десятки доли микрометра, что способствует уменьшению погонных потерь в проводниках СВЧ. С другой стороны, равномерная поверхность уменьшает прочность склеивания слоев в многослойных печатных платах и ухудшает адгезию фоторезиста. Кроме того, катаная фольга имеет горизонтальную структуру зернистости, что усложняет травление в условиях ограниченного пространства проводника.

Для изготовления электролитически осажденной фольги используют процесс гальванического осаждения меди [8] на вращающемся барабане, изготовленном из титана или нержавеющей стали. Толщина осажденного слоя меди регулируется скоростью вращения барабана. При этом со стороны барабана поверхность меди получается более гладкая и блестящая, а со стороны осаждения электролита – матовая и более шероховатая. Шероховатой стороной медь клеится к диэлектрику для улучшения адгезивных свойств при сцеплении с подложкой. Такой подход позволяет улучшить сцепление диэлектрика и фольги в ядрах, что улучшает их механические свойства, однако при этом более шероховатая сторона располагается в области с большей диэлектрической проницаемостью окружающего пространства и, как следствие, в области большей плотности электрического тока за счет эффекта "втягивания" электромагнитного поля в диэлектрик.

Типичные значения шероховатости (СКО) для различных типов медной фольги материалов произ-

водства компании Rogers^{*1} составляют 0.3...0.4 мкм для катаной фольги и 1.8...3.2 мкм для шероховатой стороны электролитически осажденной фольги. Для гладкой стороны электролитически осажденной фольги значения шероховатости близки к значениям для катаной фольги и составляют 0.4...0.5 мкм.

Для исследования влияния шероховатости поверхности медной фольги на погонные потери в линиях передачи на печатных платах проведено электродинамическое моделирование в САПР CST Microwave Studio на модели МПЛ с волновым импедансом 50 Ом, реализованной на подложке толщиной 0.203 мм. Толщина обоих слоев металлизации (МПЛ и металлический экран) была выбрана равной 18 мкм. Для исключения влияния потерь в диэлектрике тангенс угла потерь материала подложки задавался равным нулю. Шероховатость поверхности медной фольги задавалась вводом двухслойного материала с проводимостью меди и заданными параметрами СКО^{*1} неоднородностей как со стороны диэлектрика, так и с обратной (гладкой) стороны.

На рис. 1 показаны результаты электродинамического моделирования погонных потерь I в миллиметровом диапазоне длин волн в МПЛ, выполненной из гладкой (без шероховатостей), катаной и электролитически осажденной меди. Как следует из рис. 1, учет шероховатости существенно влияет на погонные потери в МПЛ. По результатам моделирования в рассматриваемом

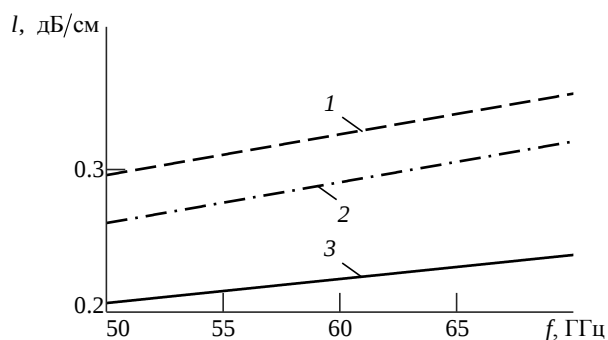


Рис. 1. Результаты электродинамического моделирования микрополосковой линии с различной шероховатостью материала: 1 – электролитически осажденная медная фольга; 2 – катаная медная фольга; 3 – гладкая фольга

Fig. 1. The results of electrodynamic simulation of a microstrip line with different roughness of the material: 1 – electrolytically deposited copper foil; 2 – rolled copper foil; 3 – smooth foil

диапазоне частот получено увеличение погонных потерь на 0.08 дБ/см при использовании катаной фольги и на 0.13 дБ/см для электролитически осажденной фольги по сравнению с потерями в случае применения гладкой фольги.

Другим источником потерь в печатных платах являются потери в диэлектрике. Наиболее распространенными при производстве СВЧ-печатных плат являются материалы на основе углеводородного термореактивного полимера с керамическим наполнителем, как, например, материалы серии RO4000^{*2} и их аналоги. Основным преимуществом таких материалов является сравнительно низкая стоимость их изготовления и возможность изготавливать многослойные платы и надежные RO4000/FR4-гибридные сборки.

Однако на частотах порядка десятков гигагерц потери в этих материалах достаточно высоки. В качестве альтернативы могут быть использованы материалы на основе фторопласта с дополнительным усилением нетканым стекловолокном, как, например, в материале RT/Duroid 5880^{*3}, или керамическим наполнителем, как в материалах серии RO3000^{*4}. Тангенс угла диэлектрических потерь материалов на основе фторопласта является наименьшим среди поставляемых в настоящий момент материалов печатных плат, что делает их наиболее подходящими для СВЧ-устройств, где потери должны быть минимальны. Основным недостатком указанных материалов являются их низкие адгезивные свойства, что значительно усложняет технологию производства многослойных печатных плат. Так, для спекания многослойной структуры обычно требуется значительное (примерно на 100 °C) повышение температуры, что усложняет технологический процесс, увеличивает стоимость и уменьшает выход годных образцов.

Следует отметить, что большинство производителей материалов печатных плат указывают в спецификациях характеристики материалов только для частот до 10 ГГц, поэтому для анализа влияния потерь в диэлектрике на характеристики

^{*1} <https://www.rogerscorp.com/documents/749/acs/Copper-Foils-for-High-Frequency-Circuit-Materials.pdf> (дата обращения: 29.09.2019).

^{*2} <https://www.rogerscorp.com/documents/726/acm/RO4000-Laminates--Data-sheet.pdf> (дата обращения: 29.09.2019).

^{*3} <https://www.rogerscorp.com/documents/606/acm/RT-duroid-5870-5880-Data-Sheet.pdf> (дата обращения: 29.09.2019).

^{*4} <https://www.rogerscorp.com/documents/722/acs/RO3000-Laminate-Data-Sheet-RO3003-RO3006-RO3010-RO3035.pdf> (дата обращения: 29.09.2019).

печатных линий передачи важной задачей является исследование характеристик материала на более высоких частотах. Экспериментальные данные измерения диэлектрической проницаемости некоторых популярных СВЧ-материалов печатных плат производства компании Rogers представлены, например, в [9].

Для исследования потерь в различных диэлектрических подложках печатных плат использованы модели МПЛ на подложках из материалов Rogers RO4350B, RO3003 и RT/Duroid 5880 с волновым импедансом 50 Ом. При моделировании для каждого из материалов выбиралась наиболее тонкая подложка из представленных в спецификациях (табл. 1). Такой выбор объясняется, в первую очередь, тем, что с уменьшением толщины подложки уменьшается ширина МПЛ с выбранным волновым импедансом, что существенно упрощает последующую интеграцию печатных линий передачи с микросхемами и элементами поверхностного монтажа, а также увеличивает плотность компоновки узлов.

Результаты электродинамического моделирования погонных потерь для МПЛ на подложках, указанных в табл. 1, представлены на рис. 2. Сплошными линиями показаны результаты, полученные для МПЛ с характеристиками фольги, изготовленной методом электролитического осаждения, штрихами показаны результаты для катаной фольги.

В соответствии с результатами моделирования потери в диэлектрической подложке играют определяющую роль для планарных линий передачи миллиметрового диапазона длин волн, выполненных на печатных платах. Тем не менее для электрически больших структур, таких, как, например, планарные фильтры, потери в проводниках также оказывают существенное влияние на общий уровень потерь в планарной структуре. Полученные результаты подтверждаются экспериментальными данными, представленными в ряде работ для более низких частот (см., например, [10]). Так, для материала с малым тангенсом угла диэлектрических потерь в области низких частот потери в проводни-

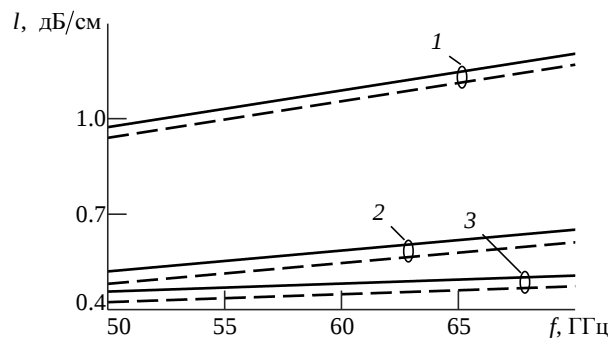


Рис. 2. Результаты электродинамического моделирования микрополосковой линии на подложках из материалов фирмы "Rogers": 1 – RO4350B; 2 – RO3003; 3 – RT/Duroid 5880.

Сплошные кривые – линии на основе электролитически осажденной фольги, штриховые кривые – линии на основе катаной фольги

Fig. 2. The results of electrodynamic simulation of a microstrip line on substrates of company "Rogers": 1 – RO4350B; 2 – RO3003; 3 – RT/Duroid 5880.

Solid curves – lines based on electrolytically deposited foil; dashed curves – lines based on rolled foil

ках превалируют над диэлектрическими потерями. Однако с ростом частоты влияние диэлектрических потерь увеличивается, и уже на частотах выше нескольких гигагерц они становятся доминирующими в общем уровне потерь. Как правило, потери в проводниках пропорциональны квадратному корню из частоты, а потери в диэлектрике пропорциональны частоте. Хотя результаты, представленные в [10], получены только для частотного диапазона до 20 ГГц, наблюдаемые зависимости справедливы и для более высоких частот.

Таким образом, на основе анализа свойств диэлектрической подложки и металлической фольги можно сделать заключение, что в миллиметровом диапазоне частот выбор материала печатной платы является ключевым фактором для уменьшения потерь в структуре печатных линий передачи.

Структура. Существует достаточно много различных вариантов реализации ВМПП миллиметрового диапазона длин волн. Например, переход может быть выполнен на основе печатной антенны, размещенной в теле металлического волновода. Антенный элемент может представлять со-

Таблица 1. Характеристики микрополосковых линий, реализованных на материалах фирмы "Rogers"

Table 1. Characteristics of microstrip lines, implemented on the materials of the company "Rogers"

Материал/ Material	Толщина подложки, мм/ Substrate thickness, mm	Ширина линии, мм/ Line width, mm	Диэлектрическая проницаемость/ Dielectric constant	Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 60 ГГц/ Dielectric loss tangent at frequency 60 GHz
RO4350B	0.101	0.2	3.66	0.0115
RO3003	0.127	0.29	3.0	0.0034
RT/Duroid 5880	0.127	0.36	2.2	0.0024

бой микрополосковую антенну [11, 12], печатный диполь [13, 14], квази-Уда-Яги-антенну [15], щелевую антенну [16, 17]. Обычно переходы указанных типов обеспечивают широкую полосу рабочих частот и не требуют модификаций в структуре подводящего волновода, однако имеют высокий уровень обратного излучения, а также значительные потери в диэлектрической подложке, которые существенно увеличиваются с ростом частоты. Другим распространенным типом переходов являются переходы, реализованные сонаправленно со структурой подводящего волновода с использованием согласующего металлического гребня [18] или на основе перекрывающихся полосковых линий [19], [20]. Однако такие переходы требуют модификаций в структуре волновода, которые должны выполняться с очень высокой точностью, что приводит к значительному увеличению стоимости изготовления и трудностям монтажа. Кроме того, зачастую переходы данного типа принципиально реализуются только на печатных платах с однослойной структурой, что затрудняет их использование в составе радиочастотных модулей, которые обычно реализуются на многослойных печатных платах. Возможным вариантом решения данной проблемы является использование печатных плат на основе комбинаций зон с однослойной и многослойной структурой [21], однако это существенно усложняет процесс изготовления печатных плат и увеличивает стоимость изготовления.

Одним из самых распространенных типов ВМПП миллиметрового диапазона длин волн яв-

ляются переходы зондового типа, в которых в структуре волноводного канала расположен проводящий зонд, реализованный на печатной плате и соединенный с МПП [22–24]. Печатная плата с зондовой структурой обычно располагается между подводящим волноводом, который может являться интерфейсом волноводного диплексера, поляризационного селектора или антенны, и дополнительной волноводной заглушкой (четверть-волновым закороченным отрезком волновода). Заглушка обеспечивает синфазное сложение падающей волны от подводящего волновода и волны, отраженной от волноводной заглушки на проводящем зонде (рис. 3, а). Обычно ВМПП зондового типа имеют малый уровень потерь на прохождение, широкую полосу частот и обеспечивают малый уровень паразитного излучения, что делает их очень привлекательными для использования в системах связи миллиметрового диапазона длин волн. Основным недостатком представленной конструкции ВМПП является наличие толстой многослойной диэлектрической подложки, через которую проходит волна в области волноводного канала. С ростом рабочей частоты диэлектрик все сильнее влияет на характеристики перехода, существенно увеличивая потери. Кроме того, диэлектрик печатной платы вносит дополнительную паразитную емкостную реактивность между подводящим волноводом и проводящим зондом, что усложняет импедансное согласование и сужает рабочую полосу [25]. Для компенсации паразитного влияния материала печатной платы и улуч-

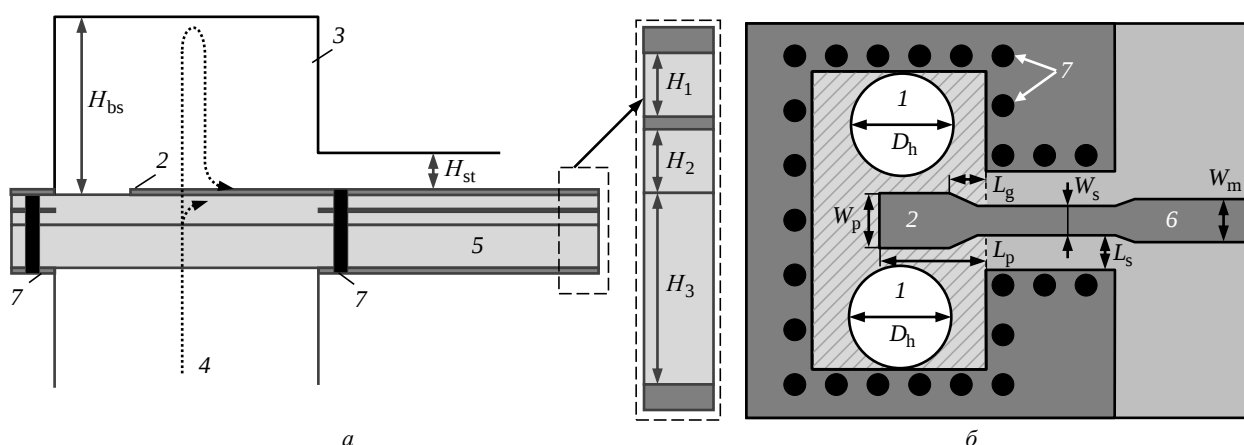


Рис. 3. Структура перехода зондового типа: а – разрез; б – вид сверху

(1 – сквозные неметаллизированные отверстия; 2 – зонд; 3 – четвертьволновая заглушка; 4 – подводящий волновод WR-15; 5 – печатная плата; 6 – микрополосковая линия; 7 – переходные отверстия)

Fig. 3. The structure of the probe type transition: а – section; б – top view

(1 – perforating non-metallic holes; 2 – probe; 3 – quarter-wave cap; 4 – supply waveguide WR-15; 5 – printed circuit board; 6 – microstrip line; 7 – vias)

шения согласования в ВМПП зондового типа обычно применяются согласующие схемы, которые могут быть основаны, например, на отрезках МПЛ [26], сложных цепях согласования [27] или на вырезах в ряде диэлектрических слоев [28]. Основным недостатком описанных подходов является сложная структура и, как правило, заметное сужение рабочей полосы частот.

В работе, которой посвящена настоящая статья, для уменьшения влияния толстой диэлектрической подложки на характеристики перехода использовались сквозные неметаллизированные отверстия в печатной плате в области волноводного канала [29]. Использование отверстий позволяет уменьшить долю диэлектрического материала в области перехода, тем самым уменьшив все негативные эффекты влияния диэлектрической подложки, описанные ранее. Отверстия диаметром D_h имеют круглую форму и симметрично расположены вокруг проводящего зонда (рис. 3, б). Выбор формы отверстий обоснован простотой их формирования сверлением, что не увеличивает стоимость производства печатных плат и пригодно для массового производства. При разработке перехода исследовались также отверстия другой формы, однако при их использовании не было достигнуто существенного улучшения характеристик перехода по сравнению с отверстиями круглой формы. Диаметр и положение отверстий оптимизировались с помощью электромагнитного моделирования с целью уменьшения потерь в переходе и улучшения коэффициента отражения.

Трехмерная модель зондового перехода показана на рис. 4. Переход основан на комбинации

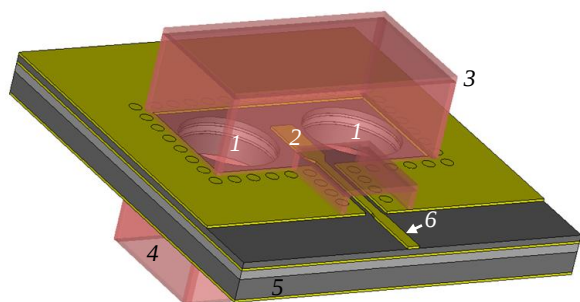


Рис. 4. Трехмерная модель разработанного перехода:
1 – сквозные неметаллизированные отверстия; 2 – зонд;
3 – четвертьволновая заглушка; 4 – подводящий волновод; 5 – печатная плата; 6 – микрополосковая линия

Fig. 4. 3D model of the developed transition:
1 – perforating non-metallic holes; 2 – probe; 3 – quarter-wave cap; 4 – supply waveguide; 5 – printed circuit board; 6 – microstrip line

печатной платы, содержащей проводящий зонд, расположенной между стандартным подводящим волноводом WR-15 сечением 3.76×1.88 мм и волноводной заглушкой того же сечения длиной порядка четверти длины волны в рассматриваемом диапазоне частот. В области волноводного канала металлизация убрана на всех слоях печатной платы (за исключением зонда) для свободного прохождения электромагнитных волн от подводящего волновода. Переходные металлизированные отверстия, расположенные по контуру подводящего волновода, позволяют эффективно продлить волноводный канал в теле платы и электрически соединить подводящий волновод и четвертьволновую заглушку. При этом обеспечивают надежное экранирование структуры перехода и предотвращение утечки сигнала или паразитного излучения. Диаметр металлизированных отверстий 0.2 мм с расстоянием между центрами около 0.4 мм. Для предотвращения отражения в области, где участок волноводной заглушки располагается над МПЛ, образуя квазиполосковую несимметричную структуру линии, было реализовано сужение, позволяющее компенсировать это влияние. Структура электрических полей в зондовом ВМПП представлена на рис. 5.

Для оценки влияния свойств диэлектрической подложки на характеристики волноводно-микрополоскового перехода его структура была реализована на двух различных печатных платах, выполненных на базе материалов Rogers 4350B (низкая стоимость, простота изготовления и применимость для массового производства, однако достаточно большое значение тангенса угла диэлектрических потерь в миллиметровом диапазоне длин волн) и Rogers RT/Duroid 5880 (наименьший тангенс угла диэлектрических потерь в миллиметровом диапазоне, однако высокая стоимость и сложность производства многослойных печатных плат).

Структура обеих плат соответствует представленной на рис. 3, а и выполнена на трех слоях диэлектрика и четырех слоях металлизации. Для обеих печатных плат ядра диэлектрика расположены на внешних слоях печатной платы и разделены одним слоем препрега (Rogers 4450B для платы на основе RO4350B и TacBond 1.5 для платы на основе RT/Duroid 5880). Размеры отдельных элементов и толщины диэлектрических слоев для обеих печатных плат представлены в табл. 2.

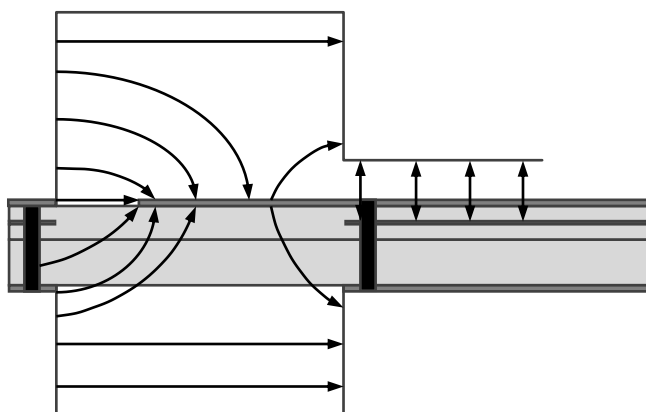


Рис. 5. Структура электрического поля зондового волноводно-микрополоскового перехода
Fig. 5. The structure of the electric field of the probe waveguide microstrip transition

Таблица 2. Размеры волноводно-микрополосковых переходов, реализованных на печатных платах из материалов фирмы "Rogers"

Table 2. Dimensions of waveguide microstrip junctions implemented on printed circuit boards from Rogers materials

Размеры, мм (см. рис. 3)/ Dimensions, mm (see Fig. 3)	RO4350B	RT/Duroid 5880
W_p	0.38	0.35
L_p	1.22	1.0
W_s	0.15	0.2
L_s	0.115	0.15
W_m	0.2	0.36
L_g	0.27	0.2
D_h	1.55	1.4
H_{bs}	1.27	1.2
H_{st}	0.3	0.3
H_1	0.101	0.127
H_2	0.1	0.144
H_3	0.338	0.381

Результаты электродинамического моделирования перехода зондового типа. ВМПП зондового типа на подложках на основе материалов Rogers RO4350B и RT/Duroid 5880 исследовались с помощью электродинамического моделирования в САПР CST Microwave Studio. При моделировании характеристики подложки задавались в соответствии с табл. 1. Для моделей переходов во всех случаях свойства проводящих слоев печатной платы задавались в соответствии с характеристиками медной фольги, изготовленной методом электролитического осаждения. В качестве материала для отрезка подводящего волновода WR-15 и заглушки использовался алюминий.

Сравнение результатов моделирования S -параметров для обоих переходов представлено на

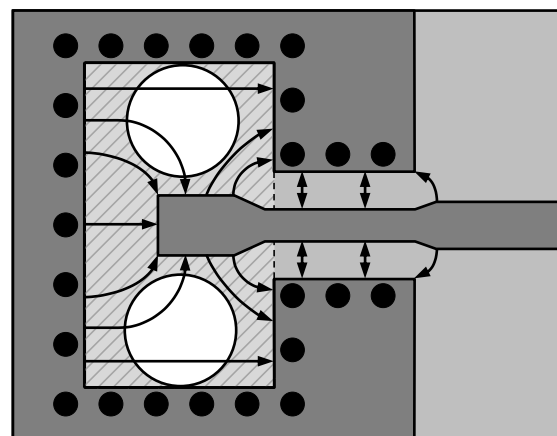


рис. 6. Как следует из результатов моделирования, переходы в рассматриваемом диапазоне частот 57...64 ГГц согласованы по уровню коэффициента отражения $S_{11} < -17$ дБ и $S_{11} < -21$ дБ для переходов на основе материалов RO4350B и RT/Duroid 5880 соответственно. Кроме того, оба перехода согласованы по уровню коэффициента отражения $S_{11} < -10$ дБ во всей полосе частот 50...70 ГГц. Уровень коэффициента прохождения в диапазоне частот 57...64 ГГц составил $S_{21} > -0.6$ и -0.35 дБ соответственно.

Экспериментальные исследования прототипов зондовых переходов. Экспериментальная проверка зондовых ВМПП выполнялась на прототипах двухсторонних переходов "волновод-МПЛ-волновод". Для каждого из переходов были подготовлены двухсторонние реализации с различной длиной МПЛ. Такой подход позволил экспериментально оценить погонные потери в МПЛ для их последующего учета при определении характеристик отдельных переходов. Длины МПЛ для изготовленных двухсторонних переходов составили 25 и 35 мм для переходов на основе материала RO4350B и 25 и 40 мм для переходов на основе RT/Duroid 5880 (рис. 7). В экспериментальных макетах переходов для уменьшения уровня потерь использовалась катаная фольга.

Экспериментальные исследования выполнены с помощью векторного анализатора цепей Rhode & Schwarz ZVA24 с внешними повышающими смесителями ZVA-Z90E. Указанное оборудование позволяет проводить измерения в частотном диапазоне 57...95 ГГц, что достаточно для исследования разработанных переходов.

Сравнение измеренных и полученных по результатам электродинамического моделирования

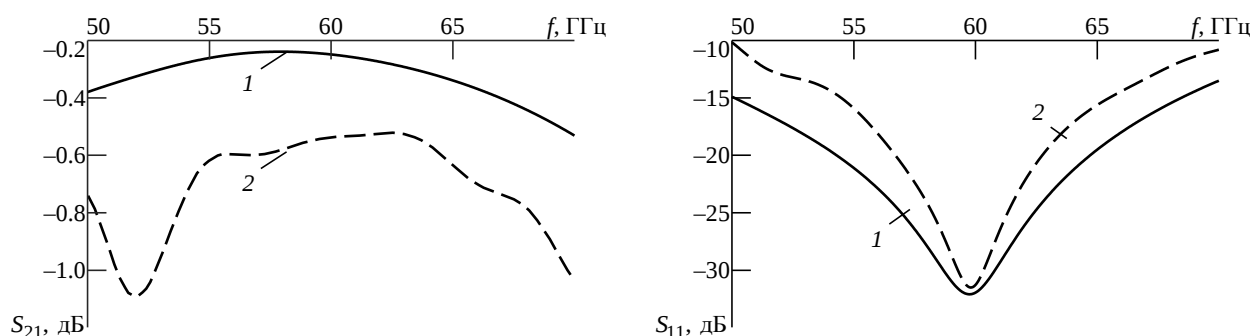


Рис. 6. Результаты электродинамического моделирования коэффициентов прохождения S_{21} и отражения S_{11} зондовых волноводно-микрополосковых переходов. Материалы подложки: 1 – RT/Duroid 5880; 2 – RO4350B

Fig. 6. Results of electrodynamic modeling of coefficients of transmission S_{21} and reflection S_{11} of probe waveguide-microstrip transitions. Backing materials: 1 – RT/Duroid 5880; 2 – RO4350B

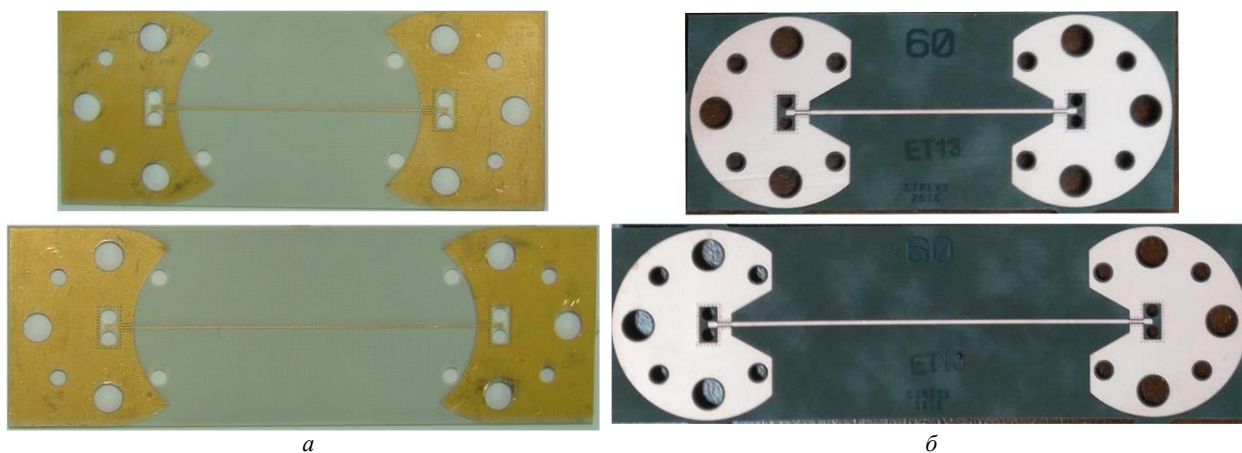


Рис. 7. Фотографии печатных плат двухсторонних переходов: а – на основе материала RO4350B; б – на основе материала RT/Duroid 5880

Fig. 7. Photos of printed circuit boards of two-way transitions: а – based on material RO4350B; б – based on material RT/Duroid 5880

коэффициентов отражения S_{11} и прохождения S_{21} для двухсторонних ВМПП представлено на рис. 8 для переходов на материале RO4350B и на рис. 9 для переходов на материале RT/Duroid 5880.

Для двухсторонних переходов достигнуто хорошее соответствие между результатами моделирования и измерения как для коэффициента отражения S_{11} , так и для коэффициента прохождения S_{21} . Так по результатам измерений, за исключением ряда точек, все двухсторонние переходы согласованы по уровню коэффициента отражения $S_{11} < -10$ дБ в полосе частот 57...70 ГГц. Увеличение коэффициента отражения по сравнению с отдельным переходом (рис. 6) вызвано переотражениями в двухсторонней структуре "волновод–МПЛ–волновод". Однако хорошее соответствие измеренных S -параметров тестовых структур с результатами моделирования позволяет сделать вывод, что для отдельного перехода значения ко-

эффициента отражения также должны быть близки к представленным на рис. 6.

По результатам измерений двухсторонних переходов с различной длиной МПЛ оценены погонные потери в МПЛ с волновым импедансом 50 Ом. В полосе частот 57...64 ГГц они составили 1.1 дБ для линии на подложке из материала RO4350B и 0.55 дБ для линии на подложке из материала RT/Duroid 5880, что хорошо согласуется с результатами электродинамического моделирования для МПЛ, выполненных из медной фольги, изготовленной методом электролитического осаждения. С учетом оценки погонных потерь в МПЛ можно определить потери на прохождение для отдельного ВМПП. Так, по результатам измерений в частотном диапазоне 57...64 ГГц потери в разработанных переходах составляют 0.4 и 0.7 дБ для материалов RT/Duroid 5880 и RO4350B соответственно, что также хорошо согласуется с результатами моделирования. Измерения проведены для

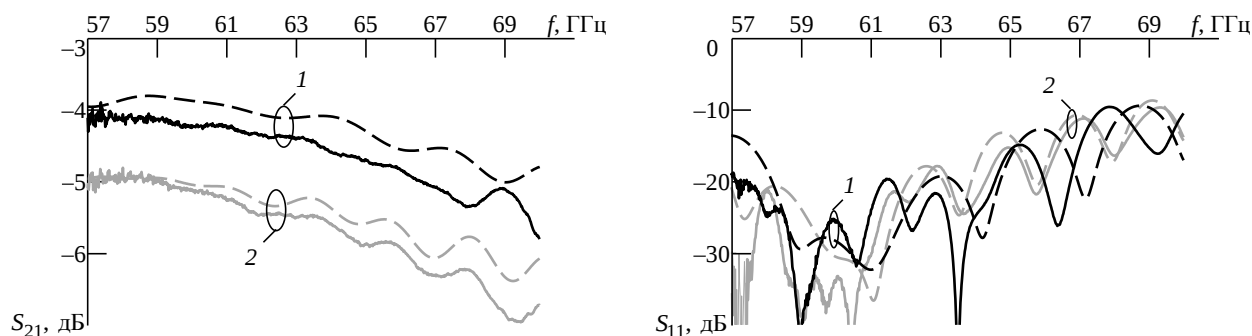


Рис. 8. Сравнение результатов моделирования и измерения коэффициентов прохождения S_{21} и отражения S_{11} двухсторонних волноводно-микрополосковых переходов на базе материала RO4350B.

Длина микрополосковой линии: 1 – 25 мм; 2 – 35 мм.

Сплошные линии – результаты моделирования; штриховые линии – результаты измерения

Fig. 8. Comparison of the results of modeling and measuring coefficients of the transmission S_{21} and reflection S_{11} of double-sided waveguide-microstrip junctions based on RO4350B.

Microstrip length: 1 – 25 mm; 2 – 35 mm.

Solid lines – simulation results; dashed lines – measurement results

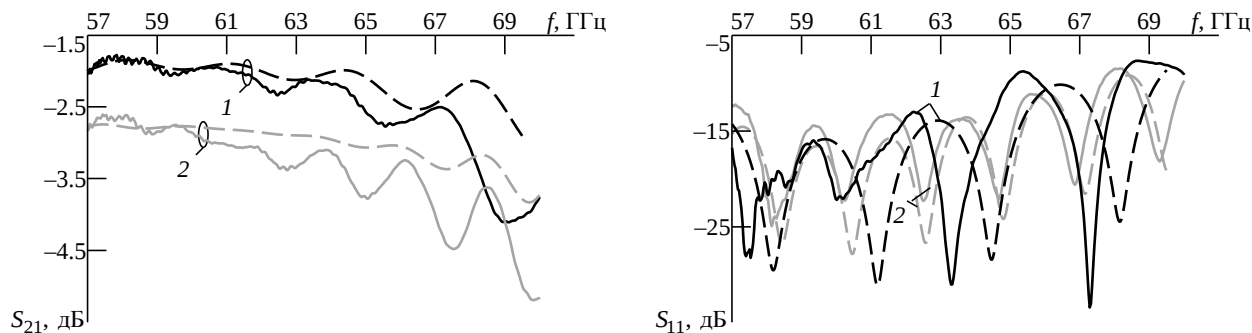


Рис. 9. Сравнение результатов моделирования и измерения коэффициентов прохождения S_{21} и отражения S_{11} двухсторонних волноводно-микрополосковых переходов на базе материала RT/Duroid 5880.

Длина микрополосковой линии: 1 – 25 мм; 2 – 40 мм.

Сплошные линии – результаты моделирования; штриховые линии – результаты измерения

Fig. 9. Comparison of the results of modeling and measuring coefficients of the transmission S_{21} and reflection S_{11} of double-sided waveguide-microstrip junctions based on RT/Duroid 5880.

Microstrip length: 1 – 25 mm; 2 – 40 mm.

Solid lines – simulation results; dashed lines – measurement results

нескольких образцов изготовленных переходов, при этом получены близкие результаты, что доказывает устойчивость характеристик разработанного ВМПП к неточностям изготовления и его применимость для массового производства.

Заключение. Рассмотрена задача разработки широкополосного ВМПП зондового типа для частотного диапазона 60 ГГц. Отличительной особенностью перехода является использование сквозных неметаллизированных отверстий в теле печатной платы, симметрично расположенных вокруг зонда. Указанные отверстия позволяют уменьшить долю диэлектрика печатной платы в волноводном канале и, тем самым, уменьшить потери в волноводе и обеспечить хорошее согласование подводящего волновода и МПЛ. Структура перехода была адаптирована к применению печатных плат.

Анализ потерь в металлической фольге и материале диэлектрика позволил обосновать выбор диэлектрика и метода изготовления фольги. В результате переход изготавливался с использованием двух распространенных СВЧ-материалов производства компании Rogers: RO4350B и RT/Duroid 5880.

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены макеты двухсторонних переходов "волновод–МПЛ–волновод" на печатных платах, выполненных на выбранных материалах. Измерения двухсторонних переходов подтвердили результаты предварительно проведенного электродинамического моделирования. Полоса пропускания разработанных переходов по уровню коэффициента отражения $S_{11} < -10$ дБ составила более 20 %. Для материала RT/Duroid 5880 погонные потери в МПЛ составили 0.55 дБ/см, а потери в переходе 0.4 дБ,

для материала RO4350B 1.1 и 0.7 дБ соответственно. В результате исследования решена проблема обеспечения низкого уровня потерь в ВМПП частотного диапазона 57...64 ГГц за счет использования СВЧ-материалов печатных плат с канатной фольгой и дополнительных неметаллизированных пере-

ходных отверстий в структуре перехода. Полученные результаты показали, что предложенная конструкция перехода позволяет добиться низких значений потерь на прохождение за счет уменьшения влияния диэлектрической подложки при использовании различных СВЧ-материалов печатных плат.

Авторский вклад

Можаровский А. В. – исследование влияния материала подложки и свойств металлической фольги на характеристики переходов между металлическим волноводом и микрополосковой линией передачи. Расчет характеристик разработанного перехода с помощью электродинамического моделирования. Экспериментальное исследование изготовленных макетов переходов. Подготовка текста статьи.

Сойкин О. В. – исследование методов уменьшения влияния диэлектрической подложки на характеристики разработанного перехода. Экспериментальное исследование изготовленных макетов переходов.

Артемченко А. А. – электродинамическое моделирование разработанного перехода.

Масленников Р. О. – руководство работой.

Вендик И. Б. – руководство работой. Подготовка текста статьи.

Authors' contribution

Andrey V. Mozharovskiy, the study of methods to reduce the influence of the dielectric substrate on the characteristics of the designed transition. Experimental study of the fabricated transition samples. Preparation of the paper text.

Oleg V. Soykin, the study of methods to reduce the influence of the dielectric substrate on the characteristics of the developed transition. An experimental study of the fabricated transition samples.

Aleksey A. Artemenko, electrodynamic simulation of the developed transition.

Roman O. Maslennikov, management of the work.

Irina B. Vendik, management of the work. Preparation of the paper text.

Список литературы

1. Five Disruptive Technology Directions for 5G / F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta, P. Popovski // IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52, iss. 2. P. 74–80. doi: 10.1109/MCOM.2014.6736746

2. 802.11-2016. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Pt. 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7786995

3. Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! / T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, F. Gutierrez // IEEE Access (Invited). 2013. Vol. 1. P. 335–349. doi: 10.1109/ACCESS.2013.2260813

4. Решение ГКРЧ от 20.12.2011 № 11-13-06-1. Об использовании радиоэлектронными средствами фиксированной службы полосы радиочастот 57–64 ГГц (в ред. от 10.03.2017 г. № 17-40-03). URL: http://grfc.ru/upload/medialibrary/713/Reshenie_GKRCH_ot_10.03.2017_17_40_03_15.02.2019.docx (дата обращения: 29.09.2019)

5. ETSI EN 302 217-3 V2.2.1 (2014-04): Harmonized European Standard. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302200_302299/30221703/02.02.01_60/en_30221703v020201p.pdf (дата обращения: 29.09.2019)

6. Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Operation in the 57–64 GHz Band. URL: http://fjallfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-13-112A1.pdf (дата обращения: 29.09.2019)

7. Stevens M., Grafton G. The Benefits of 60 GHz Unlicensed Wireless Communications. 10 p. URL: <https://www.faltnmann.de/pdf/white-paper-benefits-of-60ghz.pdf> (дата обращения: 15.02.2019)

8. Богданов Ю., Кочемасов В., Хасьянова Е. Фольгированные диэлектрики – как выбрать оптимальный вариант для печатных плат ВЧ/СВЧ-диапазонов // Печатный монтаж. 2013. № 3. С. 142–147.

9. Felbecker R., Keusgen W., Peter M. Estimation of permittivity and loss tangent of high frequency materials in the millimeter wave band using a hemispherical open resonator // IEEE Intern. Conf. on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems (COMCAS

2011), Tel Aviv, Israel, 7–9 Nov. 2011. P. 1–8. doi: 10.1109/COMCAS.2011.6105829

10. Signal transmission loss due to copper surface roughness in high-frequency region / E. Liew, T.-A. Okubo, T. Sudo, T. Hosoi, H. Tsuyoshi, F. Kuwako // IPC APEX EXPO 2014, Las Vegas, 25–27 March 2014. URL: http://www.circuitinsight.com/pdf/signal_transmission_loss_copper_surface_roughness_ipc.pdf (дата обращения: 29.09.2019)

11. Design of wideband waveguide to microstrip transition for 60 GHz frequency band / A. Artemenko, A. Maltsev, R. Maslennikov, A. Sevastyanov, V. Ssorin // Proc. of 41st European Microwave Conference (EuMC), 2011, Manchester, UK, 10–13 Oct. 2011. P. 838–841.

12. Millimeter-Wave Topside Waveguide-to-Microstrip Transition in Multilayer Substrate / Y. Ishikawa, K. Sakakibara, Y. Suzuki, N. Kikuma // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2018. Vol. 28, iss. 5. P. 380–382. doi: 10.1109/LMWC.2018.2812125

13. A V-band Waveguide Transition Design Appropriate for Monolithic Integration / J. L. Kook, H. L. Dong, J.-S. Rieh, M. Kim // Proc. of Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC), Bangkok, Thailand, 11–14 Dec. 2007. P. 1–4. doi: 10.1109/APMC.2007.4554756

14. Kim J., Choe W., Jeong J. Submillimeter-Wave Waveguide-to-Microstrip Transitions for Wide Circuits/Wafers // IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology. 2017. Vol. 7, iss. 4. P. 440–445. doi: 10.1109/THZ.2017.2701151

15. Kaneda N., Qian Y., Itoh T. A broad-band Microstrip-to-Waveguide Transition Using Quasi-Yagi Antenna // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1999. Vol. 47, iss. 12. P. 2562–2567. doi: 10.1109/22.809007

16. Low-Radiation-Loss Waveguide-to-Microstrip Transition Using a Double Slit Configuration for Microstrip Array Feeding / H. Aliakbarian, A. Enayati, M. Yousefbei, M. Shahabadi // Asia-Pacific Microwave Conf. Bangkok, Thailand, 11–14 Dec. 2007. Piscataway: IEEE, 2007. P. 737–740. doi: 10.1109/APMC.2007.4554952

17. Low-Radiation-Loss Waveguide-to-Microstrip Transition Using a Double Slit Configuration for Microstrip Array Feeding / H. Aliakbarian, A. Enayati, M. Yousefbei, M. Shahabadi // Asia-Pacific Microwave Conf., Bangkok, Thailand, 11–14 Dec. 2007. doi: 10.1109/APMC.2007.4554952

18. Design of a Wideband Transition from Double-Ridge Waveguide to Microstrip Line / Y. Zhou, H. Liu, E. Li, G. Guo, T. Yang // Intern. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology, Chengdu, China, 8–11 May 2010. Piscataway: IEEE, 2010. doi: 10.1109/icmmt.2010.5525049

19. Wideband Tapered Antipodal Fin-Line Waveguide-to-Microstrip Transition for E-band Applications /

A. Mozharovskiy, A. Artemenko, V. Ssorin, R. Maslennikov, A. Sevastyanov // Proc. of 43rd Europ. Microwave Conf. (EuMC), Nuremberg, Germany, 6–10 Oct. 2013. In 3 Vols. Vol. 3. P. 1187–1190.

20. Zhang C. W. A Novel W-Band Waveguide-To-Microstrip Antipodal Finline Transition // IEEE Intern. Conf. on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. Beijing, China, 25–27 Oct. 2013. P. 166–168. doi: 10.1109/ASEMD.2013.6780735

21. Beam-Steerable Integrated Lens Antenna with Waveguide Feeding System for 71-76/81-86 GHz point-to-point Applications / A. Mozharovskiy, A. Artemenko, A. Sevastyanov, V. Ssorin, R. Maslennikov // 10th Europ. Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP), Davos, Switzerland, 10–15 Apr. 2016. doi: 10.1109/EuCAP.2016.7481774

22. Broadband and Planar Microstrip-to-Waveguide Transitions in Millimeter-Wave Band / K. Sakakibara, M. Hirono, N. Kikuma, H. Hirayama // Intern. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology, Nanjing, China, 21–24 Apr. 2008. Piscataway: IEEE, 2008. doi: 10.1109/ICMMT.2008.4540667

23. Broadband and planar microstrip-to-waveguide transitions in millimeter-wave band / K. Sakakibara, M. Hirono, N. Kikuma, H. Hirayama // Intern. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology, Nanjing, China, 21–24 Apr. 2008. doi: 10.1109/ICMMT.2008.4540667

24. Refined characterization of E-plane waveguide to microstrip transition for millimeter-wave applications / Y. Tikhov, J.-W. Moon, Y.-J. Kim, Y. Sinelnikov // Asia-Pacific Microwave Conf. Sydney, NSW, Australia, 3–6 Dec. 2000. P. 1187–1190. doi: 10.1109/APMC.2000.926043

25. Wideband Probe-Type Waveguide-to-Microstrip Transition for V-band Applications / O. Soykin, A. Artemenko, V. Ssorin, A. Mozharovskiy, R. Maslennikov // Proc. of 46th Europ. Microwave Conf. (EuMC). London, UK, 4–6 Oct. 2016. P. 1–4. doi: 10.1109/EuMC.2016.7824262

26. Shireen R., Shi S., Prather D. W. W-band microstrip-to-waveguide transition using via fences // Progress In Electromagnetics Research Lett. 2010. Vol. 16. P. 151–160.

27. A novel microstrip-to-waveguide transition using electromagnetic bandgap structures / Y. Tahara, A. Ohno, H. Oh-hashii, S. Makino, M. Ono, T. Ohba // Proc. of Intern. Symp. on Antennas and Propagation (ISAP), 2005. P. 459–462.

28. Pat. US 6 967 542 B2. Int. Cl. H01P 5/107; H01P 5/10; H01P 005/107 (2006.01). Microstrip-Waveguide Transition / M. E. Weinstein. Publ. 2005/11/22.

29. Пат. RU 2 600 506 C1. H01P 5/107 (2006.01). Волноводно-микрополосковый переход / О. В. Сойкин, В. Н. Ссорин, А. В. Можаровский, А. А. Артеменко, Р. О. Масленников; опубли. 20.10.2016. Бюл. 29.

Информация об авторах

Можаровский Андрей Викторович – старший инженер по СВЧ-устройствам и антенной технике ООО "Радио Гигабит". Окончил Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского (2011) по специальности "Информационные системы и технологии". Соискатель кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета

Широкополосный волноводно-микрополосковый переход зондового типа миллиметрового диапазона длин волн
Wideband Waveguide-to-Microstrip Transition for mm-Wave Applications

"ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 30 печатных работ. Сфера научных интересов – антенно-фидерные устройства миллиметрового диапазона длин волн, включая печатные, волноводные и линзовые антенны и антенные решетки; планарные и волноводные дуплексирующие устройства и фильтры.

Адрес: ООО "Радио Гигабит", ул. Ошарская, д. 95, корп. 2, Нижний Новгород, 603105, Россия

E-mail: andrey.mozharovskiy@radiogigabit.com

<https://orcid.org/0000-0002-9827-6720>

Сойкин Олег Валерьевич – магистр радиофизических наук (2014), научный сотрудник ООО "Радио Гигабит". Исследователь. Преподаватель-исследователь (2018). Автор 13 научных публикаций. Сфера научных интересов – антенные системы для беспроводных систем связи; СВЧ-линии передачи/антенны и другие пассивные устройства; устройства миллиметрового диапазона длин волн.

Адрес: ООО "Радио Гигабит", ул. Ошарская, д. 95, корп. 2, Нижний Новгород, 603105, Россия

E-mail: oleg.soykin@radiogigabit.com

Артемченко Алексей Андреевич – кандидат технических наук (2013), директор по исследованиям и разработкам ООО "Радио Гигабит". Автор около 50 научных работ и 14 патентов. Сфера научных интересов – антенная техника, включая апертурные антенны, особенно антенны миллиметрового диапазона длин волн, антенные решетки, печатные антенны, антенны с электронным управлением лучом; СВЧ-техника, включая пассивные устройства и активные радиочастотные модули, такие, как волноводно-микрополосковые переходы, поляризационные селекторы, фильтры на металлических и поверхностных волноводах; СВЧ-приемопередатчики на современной электронной компонентной базе диапазонов частот от 0 до 90 ГГц.

Адрес: ООО "Радио Гигабит", ул. Ошарская, д. 95, корп. 2, Нижний Новгород, 603105, Россия

E-mail: alexey.artemenko@radiogigabit.com

Маслеников Роман Олегович – кандидат физико-математических наук (2012), генеральный директор ООО "Радио Гигабит". Автор более 100 печатных научных работ и более 30 изобретений. Сфера научных интересов – алгоритмы оптимальной обработки сигналов в современных беспроводных системах связи.

Адрес: ООО "Радио Гигабит", ул. Ошарская, д. 95, корп. 2, Нижний Новгород, 603105, Россия

E-mail: roman.maslennikov@radiogigabit.com

Вендик Ирина Борисовна – доктор технических наук (1991), профессор (1993) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), руководитель лаборатории СВЧ-микроэлектроники названного университета. Член ряда международных сообществ, в том числе IEEE (senior member) и EuMA. Автор более 300 научных работ. Сфера научных интересов – исследование свойств материалов для электроники (сверхпроводники, сегнетоэлектрики, метаматериалы); разработка устройств микроволнового и терагерцового диапазонов.

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

E-mail: ibvendik@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5632-1223>

References

1. Boccardi F., Heath R. W., Lozano A., Marzetta T. L., Popovski P. Five Disruptive Technology Directions for 5G. IEEE Communications Magazine. 2014, vol. 52, iss. 2, pp. 74–80. doi: 10.1109/MCOM.2014.6736746
2. 802.11-2016. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Pt 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7786995
3. Rappaport T. S., Sun S., Mayzus R., Zhao H., Azar Y., Wang K., Wong G. N., Schulz J. K., Samimi M., Gutierrez F. Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! IEEE Access (Invited). 2013, vol. 1, pp. 335–349. doi: 10.1109/ACCESS.2013.2260813
4. Decision of the State Committee for Emergencies of 12.12.2011 no. 11-13-06-1. On the Use by Radio-Electronic Means of the Fixed Service of the Radio Frequency Band 57–64 GHz. Available at: http://grfc.ru/upload/medialibrary/713/Reshenie_GKRCH_ot_10.03.2017_17_40_03_15.02.2019.docx (accessed: 29.09.2019)
5. ETSI EN 302 217-3 V2.2.1 (2014-04): Harmonized European Standard. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302200_302299/30221703/02.02.01_60/en_30221703v020201p.pdf (accessed: 29.09.2019)
6. Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Operation in the 57–64 GHz Band. Available at: http://fjallfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-13-112A1.pdf (accessed: 29.09.2019)
7. Stevens M., Grafton G. The Benefits of 60 GHz Unlicensed Wireless Communications. 10 p. Available at: <https://www.faltnann.de/pdf/white-paper-benefits-of-60ghz.pdf> (accessed: 15.02.2019)
8. Bogdanov Yu., Kochemasov V., Khas'yanova E. Foil Dielectrics – How to Choose the Best Option for RF / Microwave Circuit Boards. *Pechatnyi montazh* [Printed Wiring]. 2013, no. 3, pp. 142–147. (In Russ.)

9. Felbecker R., Keusgen W., Peter M. Estimation of Permittivity and Loss Tangent of High Frequency Materials in the Millimeter Wave Band Using a Hemispherical Open Resonator. IEEE Intern. Conf. on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems (COMCAS 2011). Tel Aviv, Israel, 7–9 Nov. 2011, pp. 1–8. doi: 10.1109/COMCAS.2011.6105829
10. Liew E., Okubo T.-A., Sudo T., Hosoi T., Tsuyoshi H., Kuwako F. Signal Transmission Loss Due to Copper Surface Roughness in High-Frequency Region. IPC APEX EXPO 2014. Las Vegas, 25–27 March 2014. Available at: http://www.circuitinsight.com/pdf/signal_transmission_loss_copper_surface_roughness_ipc.pdf (accessed: 29.09.2019)
11. Artemenko A., Maltsev A., Maslennikov R., Sevastyanov A., Ssorin V. Design of Wideband Waveguide to Microstrip Transition for 60 GHz Frequency Band. Proc. of 41st European Microwave Conference (EuMC), Manchester (UK), 10–13 Oct. 2011, pp. 838–841.
12. Ishikawa Y., Sakakibara K., Suzuki Y., Kikuma N. Millimeter-Wave Topside Waveguide-to-Microstrip Transition in Multilayer Substrate. IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2018, vol. 28, iss. 5, pp. 380–382. doi: 10.1109/LMWC.2018.2812125
13. Kook J. L., Dong H. L., Rieh J.-S., Kim M. A V-band Waveguide Transition Design Appropriate for Monolithic Integration. Proc. of Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC). Bangkok, Thailand, 11–14 Dec. 2007, pp. 1–4. doi: 10.1109/APMC.2007.4554756
14. Kim J., Choe W., Jeong J. Submillimeter-Wave Waveguide-to-Microstrip Transitions for Wide Circuits/Wafers. IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology. 2017, vol. 7, iss. 4, pp. 440–445. doi: 10.1109/TTHZ.2017.2701151
15. Kaneda N., Qian Y., Itoh T. A Broad-Band Microstrip-to-Waveguide Transition Using Quasi-Yagi Antenna. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1999, vol. 47, iss. 12, pp. 2562–2567. doi: 10.1109/22.809007
16. Aliakbarian H., Enayati A., Yousefbeigi M., Shahabadi M. Low-Radiation-Loss Waveguide-to-Microstrip Transition Using a Double Slit Configuration for Microstrip Array Feeding. Asia-Pacific Microwave Conf. Bangkok, Thailand, 11–14 Dec. 2007. Piscataway, IEEE, 2007, pp. 737–740. doi: 10.1109/APMC.2007.4554952
17. Aliakbarian H., Enayati A., Yousefbeigi M., Shahabadi M. Low-Radiation-Loss Waveguide-to-Microstrip Transition Using a Double Slit Configuration for Microstrip Array Feeding. Asia-Pacific Microwave Conf. Bangkok, Thailand, 11–14 Dec. 2007. doi: 10.1109/APMC.2007.4554952
18. Zhou Y., Liu H., Li E., Guo G., Yang T. Design of a Wideband Transition from Double-Ridge Waveguide to Microstrip Line. Intern. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology. Chengdu, China, 8–11 May 2010. Piscataway, IEEE, 2010. doi: 10.1109/icmmt.2010.5525049
19. Mozharovskiy A., Artemenko A., Ssorin V., Maslennikov R., Sevastyanov A. Wideband Tapered Antipodal Fin-Line Waveguide-to-Microstrip Transition for E-band Applications. Proc. of 43rd Europ. Microwave Conf. (EuMC). Nuremberg, Germany, 6–10 Oct. 2013. In 3 Vols, vol. 3, pp. 1187–1190.
20. Zhang C. W. A Novel W-Band Waveguide-To-Microstrip Antipodal Finline Transition. IEEE Intern. Conf. on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. Beijing, China, 25–27 Oct. 2013, pp. 166–168. doi: 10.1109/ASEMD.2013.6780735
21. Mozharovskiy A., Artemenko A., Sevastyanov A., Ssorin V., Maslennikov R. Beam-Steerable Integrated Lens Antenna with Waveguide Feeding System for 71–76/81–86 GHz point-to-point Applications. 10th Europ. Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP). Davos, Switzerland, 10–15 April 2016. doi: 10.1109/EuCAP.2016.7481774
22. Sakakibara K., Hirono M., Kikuma N., Hirayama H. Broadband and Planar Microstrip-to-Waveguide Transitions in Millimeter-Wave Band. Intern. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology. Nanjing, China, 21–24 April 2008. Piscataway, IEEE, 2008. doi: 10.1109/ICMMT.2008.4540667
23. Sakakibara K., Hirono M., Kikuma N., Hirayama H. Broadband and Planar Microstrip-To-Waveguide Transitions in Millimeter-Wave Band. Intern. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology. Nanjing, China, 21–24 April 2008. doi: 10.1109/ICMMT.2008.4540667
24. Tikhov Y., Moon J.-W., Kim Y.-J., Sinelnikov Y. Refined Characterization of E-Plane Waveguide to Microstrip Transition for Millimeter-Wave Applications. Asia-Pacific Microwave Conf. Sydney, NSW, Australia, 3–6 Dec. 2000, pp. 1187–1190. doi: 10.1109/APMC.2000.926043
25. Soykin O., Artemenko A., Ssorin V., Mozharovskiy A., Maslennikov R. Wideband Probe-Type Waveguide-to-Microstrip Transition for V-band Applications. Proc. of 46th Europ. Microwave Conf. (EuMC). London, UK, 4–6 Oct. 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/EuMC.2016.7824262
26. Shireen R., Shi S., Prather D. W. W-Band Microstrip-to-Waveguide Transition Using Via Fences. Progress In Electromagnetics Research Letters. 2010, vol. 16, pp. 151–160.
27. Tahara Y., Ohno A., Oh-hashii H., Makino S., Ono M., Ohba T. A Novel Microstrip-to-Waveguide Transition Using Electromagnetic Bandgap Structures. Proc. of Intern. Symp. on Antennas and Propagation (ISAP), 2005, pp. 459–462.
28. Pat. US 6 967 542 B2. Int. Cl. H01P 5/107; H01P 5/10; H01P 005/107 (2006.01). Weinstein M. E. Microstrip-Waveguide Transition. Publ. 2005/11/22.
29. Soikin O. V., Ssorin V. N., Mozharovskii A. V., Artemenko A. A., Maslennikov R. O. Waveguide Microstrip Junction. Pat. RF 2 600 506 C1. H01P 5/107 (2006.01). Publ. 20.10.2016. Bul. 29. (In Russ.)

Information about the authors

Andrey V. Mozharovskiy, Senior microwave systems and antennas engineer in LLC "Radio Gigabit". He graduated from Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (2011) with a degree in "Information Systems and Technologies". He is a PhD student of the Department of Microradioelectronics and Radio Technology at Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 30 scientific publications. Area of expertise: various millimeter wavelength range antenna and feeding systems, including printed, waveguide and lens antennas and antenna arrays; planar and waveguide duplexing devices and filters.

Address: LLC "Radio Gigabit", 95 bld. 2, Osharskaya Str., Nizhny Novgorod 603105, Russia

E-mail: andrey.mozharovskiy@radiogigabit.com

<https://orcid.org/0000-0002-9827-6720>

Oleg V. Soykin, Master Sci. (2014) on Radiophysics, Researcher in LLC "Radio Gigabit". The author of 13 scientific publications. Area of expertise: antenna systems for wireless communication systems; microwave transmission lines/antennas and other passive devices; millimeter wavelength devices.

Address: LLC "Radio Gigabit", 95 bld. 2, Osharskaya Str., Nizhny Novgorod 603105, Russia

E-mail: oleg.soykin@radiogigabit.com

Aleksey A. Artemenko, Cand. Sci. (Eng.) (2013), R&D director in LLC "Radio Gigabit". The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: antenna technology, including aperture antennas, especially millimeter-wave antennas, antenna arrays, printed antennas, and electronically controlled antennas; microwave technology, including passive devices and active radio frequency modules, such as waveguide-to-microstrip transitions, polarization selectors, filters on metal and surface mounted waveguides; microwave transceivers on a modern electronic component base in frequency bands from 0 to 90 GHz.

Address: LLC "Radio Gigabit", 95 bld. 2, Osharskaya Str., Nizhny Novgorod 603105, Russia

E-mail: alexey.artemenko@radiogigabit.com

Roman O. Maslennikov, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2012), CEO in LLC "Radio Gigabit". The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: optimal signal processing algorithms in modern wireless communication systems.

Address: LLC "Radio Gigabit", 95 bld. 2, Osharskaya Str., Nizhny Novgorod 603105, Russia

E-mail: roman.maslennikov@radiogigabit.com

Irina B. Vendik, Dr. Sci. (Eng.) (1991), Professor (1993) of the Department of Microradioelectronics and Radio Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University, Head of the Laboratory of Microwave Microelectronics named university. She is a member of a number of international communities, including IEEE (senior member) and EuMA. The author of more than 300 scientific publications. Area of expertise: properties of materials for electronics (superconductors, ferroelectrics, metamaterials); microwave and terahertz devices.

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

E-mail: ibvendik@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5632-1223>

Экспериментальное исследование широкополосной антенной решетки К-диапазона с использованием структур из искусственного неоднородного диэлектрика

А. М. Александрин[✉], Ю. П. Саломатов

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

[✉] aalexandrin@sfu-kras.ru

Аннотация

Введение. В связи с освоением миллиметрового диапазона и развитием средств широкополосной связи имеется потребность в антенных системах, которые работали бы в широкой полосе частот (порядка октавной), имели высокую направленность и компактные размеры. Имеющиеся решения, как правило, не удовлетворяют данным требованиям.

Цель работы. Конструирование и экспериментальное исследование антенной решетки (АР) К-диапазона, обладающей высоким коэффициентом использования площади (КИП) и малыми продольными размерами.

Материалы и методы. Численные исследования проводились в САПР СВЧ (CST Studio Suite), экспериментальные исследования – на оборудовании для векторного анализа СВЧ-цепей (Agilent E8363B PNA). Характеристики направленности измерялись методом сканирования ближнего поля.

Результаты. Предложен вариант реализации широкополосной АР К-диапазона (18...26 ГГц). Период АР составляет 2.25 длины волны на верхней частоте диапазона. Для подавления дифракционных лепестков использован дополнительный слой, состоящий из линз из искусственного неоднородного диэлектрика, сформированный из тонких фигурных слоев листового полиэтилентерефталата. Предложена гибридная конфигурация диаграммообразующей схемы (ДОС), в которой одна часть схемы выполнена на основе печатных двухпроводных линий передачи, а другая – на прямоугольных волноводах. АР имеет КСВ ниже 2 и КИП выше 0.5, уровень боковых и дифракционных лепестков не превышает –12 в диапазоне 18...26 ГГц. Суммарная толщина всей системы составила 50 мм, что равно $4.3\lambda_{\min}$. Если из конструкции исключить волноводную часть, толщина может быть уменьшена до $2.5\lambda_{\min}$, что обеспечивает компактность АР при широкой полосе рабочих частот.

Заключение. По сравнению с имеющимися решениями антенна имеет более простую ДОС, за счет чего улучшается согласование с фидером. За счет применения линз из неоднородного диэлектрика обеспечивается высокий апертурный КИП в широкой полосе частот.

Ключевые слова: антенная решетка, широкополосная антенна, неоднородный диэлектрик, линзовая антенна

Для цитирования: Александрин А. М., Саломатов Ю. П. Экспериментальное исследование широкополосной антенной решетки К-диапазона с использованием структур из искусственного неоднородного диэлектрика // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 5. С. 33–41. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-33-41

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.09.2019; принята к публикации после рецензирования 15.10.2019; опубликована онлайн 29.11.2019



Experimental Study of K-Band Broadband Antenna Array Using Artificial Inhomogeneous Dielectric Structures

Anton M. Aleksandrin[✉], Yuri P. Salomatov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

[✉] aalexandrin@sfu-kras.ru

Abstract

Introduction. As a result of the extensive development of broadband communication in the millimetre wave band, there has arisen a need for antenna systems with a high level of directivity and compact dimensions, capable of operating across wide frequency ranges. However, at present, few engineering solutions satisfy this demand.

Aim. To develop and study experimentally a K-band antenna array (AR) characterized by a high aperture efficiency and compact longitudinal dimensions.

Materials and methods. Computer simulations were performed using the CST Studio Suite software. Measurements were carried out using an Agilent E8363B PNA vector circuit analyzer. Radiation patterns were obtained by the method of near-field scanning.

Results. A K-band broadband antenna array configuration operating over the 18...26 GHz range was proposed. It was found that the period of the array equals 2.25 wavelengths at the highest operating frequency. In order to suppress grating lobes, an additional layer consisting of artificial inhomogeneous dielectric lenses was used. The dielectric material consisted of thin curly layers of sheet polyethylene terephthalate. Additionally, a hybrid configuration of feeding network was proposed, in which one part of the network was developed by means of printed two-wire lines, while the other part was achieved by means of rectangular waveguides. The proposed antenna array demonstrates VSWR of less than 2 and an aperture efficiency above 0.5, side and diffractive lobe levels not exceed -12 in the 18...26 GHz range. The total thickness of the configuration equals 50 mm or $4.3\lambda_{\min}$. In order to ensure the compactness of the AR for wideband frequency applications, the thickness of the system can be reduced to $2.5\lambda_{\min}$ by excluding the waveguide part.

Conclusion. When compared with existing solutions, the proposed antenna has a simpler feed network, which yields better matching. High aperture efficiency is achieved in the wide frequency range by means of inhomogeneous dielectric lenses.

Key words: antenna array, broadband antenna, inhomogeneous dielectric, lens antenna

For citation: Aleksandrin A. M., Salomatov Yu. P. Experimental Study of K-Band Broadband Antenna Array Using Artificial Inhomogeneous Dielectric Structures. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 5, pp. 33–41. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-33-41

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

Submitted 16.09.2019; accepted 15.10.2019; published online 29.11.2019

Введение. В настоящее время с целью увеличения пропускной способности каналов передачи информации, развития широкополосных средств связи и радиолокации интенсивно осваивается миллиметровый диапазон длин волн [1–3]. Активно развиваются программы широкополосного спутникового доступа в Интернет в К-диапазоне [4]. Расширяется необходимость использования широкополосных средств радиомониторинга и радиоизмерений. Техническая и эксплуатационная эффективности указанных систем не в последнюю очередь определяются используемыми антеннами.

Широкое распространение перечисленных систем предъявляет определенные требования к их ан-

тенным системам, которые должны быть широкополосными, компактными, допускать легкий монтаж и развертывание, иметь низкую стоимость. Требования компактности, широкополосности и высокой направленности в известной мере противоречивы:

- широкополосные узконаправленные антенны на основе зеркал и линз имеют выносные элементы и, соответственно, значительные продольные размеры;

- компактные антенные решетки (АР), выполняемые по печатной технологии, работают, как правило, в узкой полосе частот и зачастую имеют очень сложную диаграммообразующую схему (ДОС), затрудняющую согласование в широкой полосе частот;

– некоторые типы широкополосных и компактных антенн (например, логопериодические), удовлетворяя описанным требованиям, не обеспечивают высокой направленности.

Для решения описанных проблем в настоящей статье предложена АР, содержащая фокусирующие линзы из искусственного неоднородного диэлектрика. С помощью линз достигается сужение диаграммы направленности (ДН) элемента АР за счет эффективного подавления дифракционных лепестков и таким образом обеспечивается работа в широкой полосе частот.

В [5] предложен способ реализации линз из неоднородного диэлектрика (ЛНД), определены предельные значения параметров дискретизации однородного диэлектрика, из которого изготавливается ЛНД, таких как толщина элементарного цилиндрического слоя и количество фигурных "лепестков", реализующих переменный закон изменения диэлектрической проницаемости [6]. В [7] рассмотрена конструкция АР с ЛНД, составленной из 16 элементов, расположенных гексагонально.

В настоящей статье рассмотрена АР из 64 элементов с ДОС гибридного типа на основе печатных двухпроводных линий и волноводов. Такая конфигурация используется с целью снижения потерь в печатных линиях передачи за счет замены их части волноводами, в которых затухание существенно меньше.

Разрабатываемая АР рассчитана на работу в К-диапазоне (18...26 ГГц).

Описание экспериментальных образцов.
Диаграммообразующая схема. Чтобы избежать появления дифракционных лепестков при работе АР в широком диапазоне частот, ее период должен составлять 0.5 от длины волны на верхней границе диапазона $\lambda_{\min}$. При этом размеры широкополосных излучателей определяются длиной волны на нижней рабочей частоте $\lambda_{\max}$. При определенной ширине полосы неизбежно перекрывание излучателями друг друга. Известны широкополосные АР, в которых применяется именно такая конфигурация излучателей – АР на основе сильносвязанных вибраторов. В таких АР концы вибраторов заходят друг на друга, образуя встречно-штыревую структуру [8]. Существуют различные вариации таких АР с различными способами "упаковки" излучателей на плоскости, например переплетенные спирали [9].

Помимо сильносвязанных вибраторов существуют также АР на основе длинных щелей [10–12].

Недостатки этих способов следующие:

– невозможно разместить ДОС на общей подложке с излучающими элементами. Это ведет к необходимости предусматривать элементы перехода между линиями передач различных типов, что, в свою очередь, затрудняет согласование;

– плотность расположения излучателей очень велика, так как период структуры должен быть меньше $0.5\lambda_{\min}$. Это приводит к сложностям в проектировании ДОС для такой решетки и к ухудшению согласования.

Другой способ расширения рабочей полосы АР состоит в увеличении ее периода за счет уменьшения числа элементов и упрощения таким образом ДОС. Для подавления дифракционных лепестков в данном случае необходимо применять фокусирующие элементы, сужающие ДН каждого излучателя. В качестве таких элементов возможно применение линз из неоднородного диэлектрика [13–15].

В рассматриваемой конструкции АР излучателями служат печатные широкополосные вибраторы-"бабочки", вытравленные на подложке из материала Rogers RT5880 с тангенсом угла диэлектрических потерь $\tan \delta = 0.0009$, что соответствует потерям порядка 4 дБ/м на частоте 26 ГГц (рис. 1).

Плечи вибраторов располагаются на разных сторонах подложки, а питание осуществляется печатной двухпроводной линией (ДПЛ), подводимой к центру вибратора. Элементы расположены гексагонально, ДОС имеет двоично-этажную конфигурацию. Период АР составляет 3.25λ на верхней частоте 26 ГГц.

Первые две ступени делителя выполнены на основе волноводной линии стандарта WR42, имеющей размеры 10.67×4.32 мм и коэффициент затухания порядка 0.4 дБ/м. Волновод образован

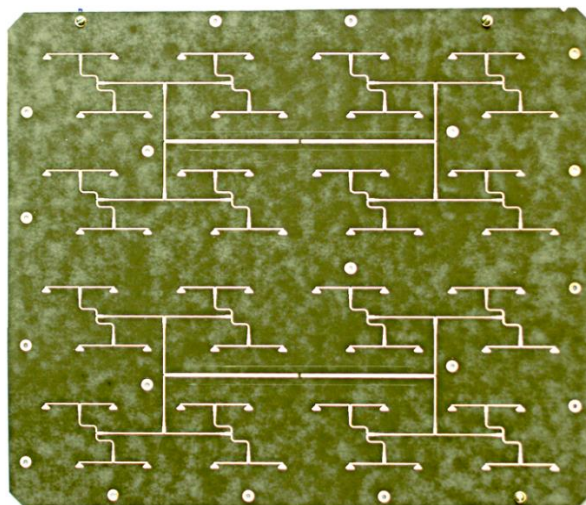


Рис. 1. Топология печатной платы АР

Fig. 1. Feeding network circuit

двумя алюминиевыми деталями. Первая деталь образует одну из широких стенок волновода, а также выполняет функции отражающего экрана для элементов АР и несущего элемента для крепления линз (рис. 2, 1), вторая деталь в виде прямоугольной канавки в толстой пластине образует оставшиеся три стенки волновода (рис. 2, 2 и рис. 3). Для сопряжения печатной линии и волновода применяется специальный плавный переход.

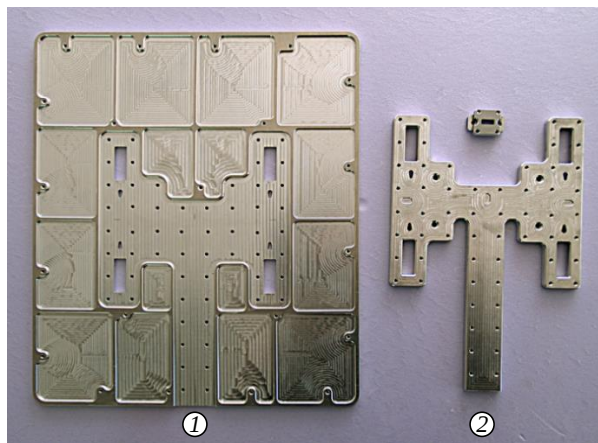


Рис. 2. Волноводный делитель на четыре направления (без переходов на двухпроводную линию)

Fig. 2. Waveguide divider (without transitions to two-wire line)

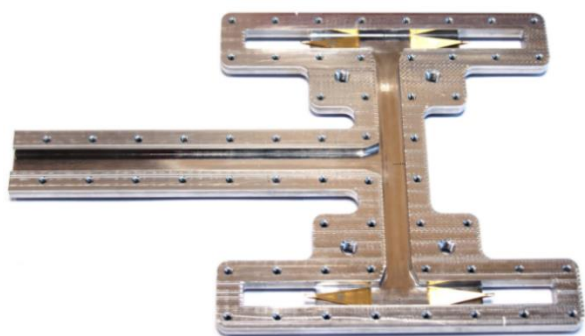
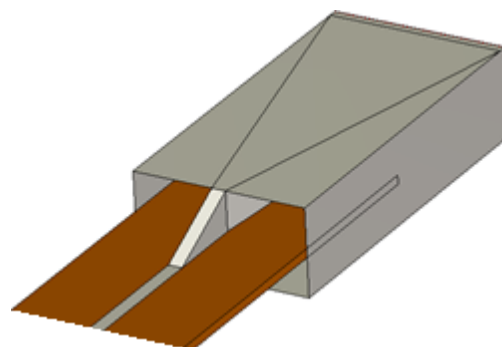


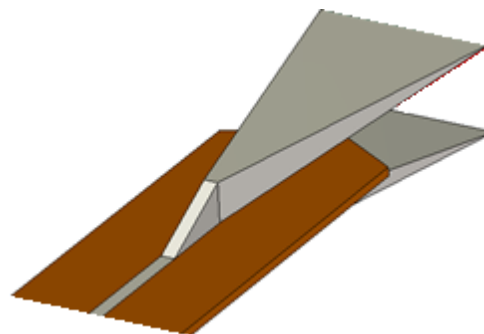
Рис. 3. Нижняя часть волноводного делителя (вид изнутри); линии оканчиваются переходами на двухпроводную линию

Fig. 3. Bottom part of the waveguide divider (inside view). Lines end with transitions to two-wire line

Волноводно-двухпроводной переход. На рис. 4 представлен изометрический вид перехода с прямоугольного волновода на печатную двухпроводную линию. Волноводно-двухпроводной переход представляет собой плавный линейный переход волновода в Н-образный волновод с последующим плавным переходом на печатную линию. Диэлектрическая подложка печатной линии заходит в пространство между гребнями Н-образного волновода и заканчивается треугольным сужением диэлектрика. Проводники линии заканчиваются в месте перехода их в гребни волновода.



а



б

Рис. 4. Изометрический вид перехода от волновода к двухпроводной симметричной планарной линии передачи: а – полностью; б – без стенок волновода

Fig. 4. Isometric view from the waveguide to transition two-wire symmetrical line: а – completely; б – without the walls of the waveguide

В экспериментальном исследовании измерялся коэффициент отражения (КО) системы из двух идентичных переходов, соединенных отрезком ДПЛ длиной 140 мм (рис. 5).

Описанная система имеет два волноводных порта. В ней происходят отражения как от входного, так и от выходного портов. Чтобы устранить влияние отражений от выходного порта, применяется фильтрация частотной характеристики S_{11} во временной области. Данная возможность предоставляется прибором Agilent E8363B PNA.

На рис. 6, 7 показан возможный способ подключения печатной ДПЛ к волноводу при помощи данного перехода. В рассматриваемом случае используется гибкая подложка, в которой вырезается "язычок", заходящий между двумя гребнями Н-образного волновода.



Рис. 5. Экспериментальная цепь из двух переходов, соединенных отрезком ДПЛ

Fig. 5. Experimental circuit from two transitions connected with a fragment of the two-wire line

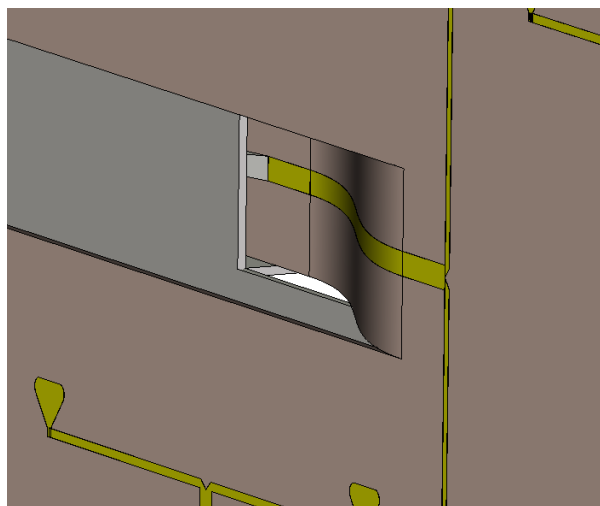


Рис. 6. Переход от волновода к двухпроводной линии (вид спереди)

Fig. 6. Front view of the transition from the waveguide to two-wire line

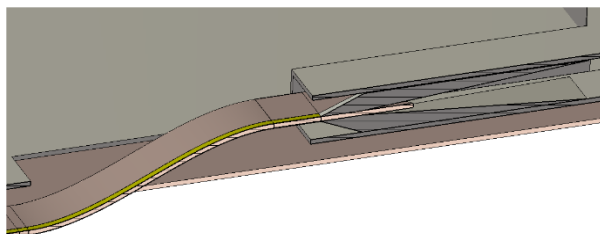


Рис. 7. Внутреннее устройство перехода, сечение через E -плоскость волновода

Fig. 7. Inside construction of the transition, cross-section through E -plane of the waveguide

Экспериментальный макет АР. Полный макет АР (рис. 8) состоит из 64 излучателей, расположенных в узлах гексагональной сетки.

В качестве верхней стенки прямоугольного волновода выступает нижняя часть металлической пластины, играющей также роль экрана (рис. 2).

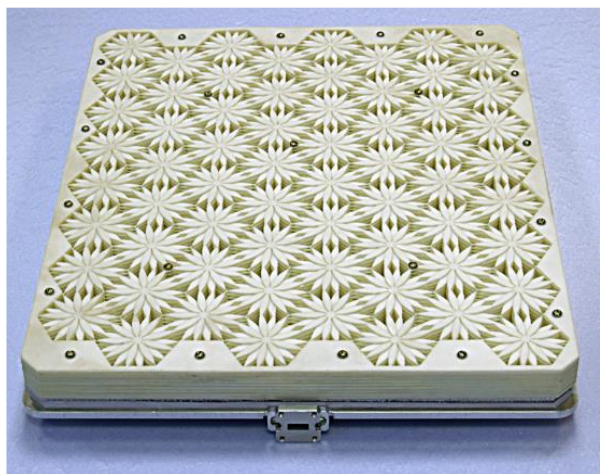


Рис. 8. Экспериментальный макет АР (вид сверху)

Fig. 8. Experimental model of the antenna array (top view)

Остальные три стенки образованы прямоугольными канавками в ответной части волноводного делителя.

Фокусирующий слой набран из 22 слоев листового полиэтилентерефталата толщиной 1 мм, из которого лазерной резкой вырезаны лепестки для создания линз.

Между экраном, платой ДОС и слоем линз введены зазоры в 5.2 и 2 мм соответственно, которые обеспечиваются прослойками пенополистирола, а также пластиковыми шайбами соответствующей толщины. Все слои конструкции скрепляются винтами по периметру и в 5 центральных точках.

Габариты макета АР составляют $330 \times 290 \times 50$ мм, таким образом, продольный размер антенны равен $4.3\lambda_{\min}$.

Методы исследования. Излучающие структуры численно моделировались при помощи пакета CST Studio Suite. Характеристики экспериментального образца волноводно-двухпроводного перехода измерялись векторным анализатором цепей Agilent E8363B PNA, позволяющим измерять S -параметры четырехполосников в полосе частот 0.01...40 ГГц. Указанный прибор обеспечивает также фильтрацию получаемых характеристик во временной области, что позволяет при необходимости исключить из них влияние отражений от определенных элементов измеряемой цепи. Для измерения характеристик направленности использовался разработанный на кафедре радиотехники Сибирского федерального университета аппаратно-программный комплекс для измерения характеристик антенн в ближней зоне, состоящий из безэховой камеры, четырехкоординатного плоского сканера и программного обеспечения для обработки измерений. ДН и коэффициент направленного действия (КНД) вычислялись по амплитудно-фазовому распределению в раскрыве антенны. Коэффициент усиления (КУ) измерялся методом эталонной антенны.

Результаты исследований. Волноводно-двухпроводной переход. На рис. 9 представлены частотные характеристики модуля КО для нескольких длин перехода (L_{Π}).

В соответствии с данными расчетов длина экспериментального перехода выбрана равной 26 мм, что соответствует его работе в диапазоне 18...26 ГГц.

На рис. 10 представлена частотная зависимость $S_{11\Pi}$, полученная при помощи исключения отражений от второго порта фильтрацией во временной области. Расчетная кривая соответствует длине перехода 26 мм.

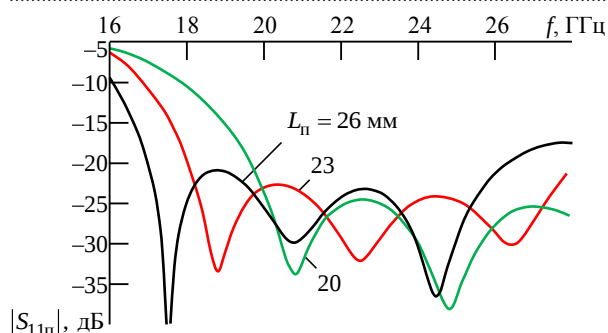


Рис. 9. Расчетные частотные зависимости модуля КО волноводно-двухпроводного перехода

Fig. 9. Simulated frequency dependences of the reflection coefficient modulus of the waveguide two-wire transition

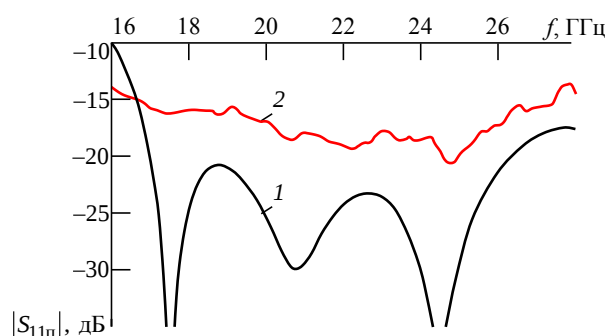


Рис. 10. КО волноводно-двухпроводного перехода: 1 – расчет для $L_n = 26$ мм; 2 – эксперимент

Fig. 10. Reflection coefficient of the transition from waveguide to two-wire line:

1 – calculation for $L_n = 26$ mm; 2 – experiment

Экспериментальный макет АР. В ходе экспериментальных исследований макета АР измерялись КО (рис. 11), ДН на верхней частоте рабочего диапазона в сечениях $\varphi = 0, 30, 60$ и 90° (рис. 12), уровни боковых лепестков (УБЛ) в этих сечениях ДН; частотные зависимости КНД и КУ.

На рис. 13 представлены графики уровня боковых лепестков в различных характерных сечениях трехмерной характеристики направленности АР. Под УБЛ здесь понимается наибольший уровень любого из всех боковых лепестков антенны. В плоскостях E ($\varphi = 90^\circ$) и H ($\varphi = 0$) таковым являлся первый боковой лепесток, уровень которого составлял примерно -12 дБ во всей полосе частот.

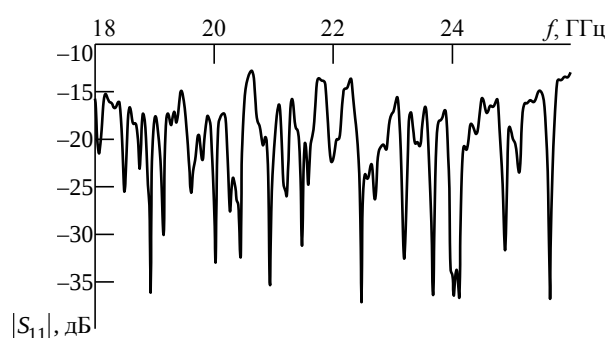


Рис. 11. КО от входа АР

Fig. 11. Reflection coefficient from the antenna input

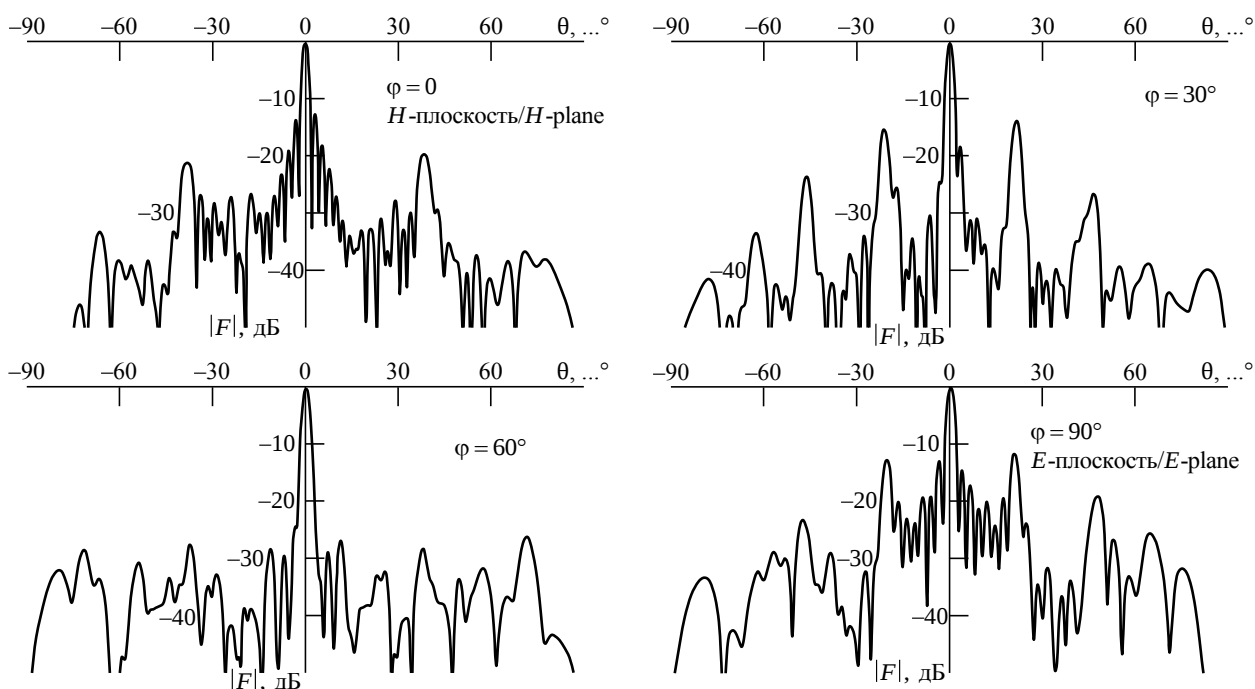


Рис. 12. ДН АР на частоте 26 ГГц

Fig. 12. Array radiation pattern at the frequency 26 GHz

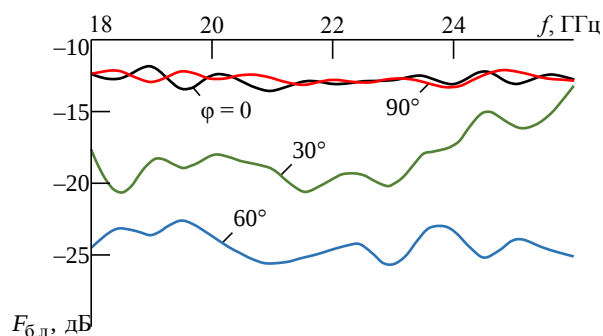


Рис. 13. Уровень максимального бокового лепестка ДН АР
Fig. 13. The level of the maximum side lobe of the antenna radiation pattern

На рис. 14 представлены экспериментальные частотные зависимости КНД (D_3) и КУ (G_3) антенны, а также для сравнения приведен график КНД синфазной равномерно возбуждаемой идеальной апертуры ($D_{ид}$), равной исследуемой антенной площадью.

Обсуждение. Волноводно-двухпроводной переход. Наиболее важным габаритным параметром перехода является его длина ($L_{п}$). Численные исследования показывают, что этот параметр определяет нижнюю рабочую частоту перехода. Коэффициент перекрытия рабочей полосы перехода по уровню -20 дБ составляет примерно 1.5. Как видно из рис. 10, коэффициент передачи экспериментального волноводно-двухпроводного перехода в рабочей полосе частот не превышает -15 дБ, но это существенно выше расчетных данных. Такое расхождение может быть обусловлено неточностью позиционирования проводников печатной линии относительно гребней волновода и недостаточно точным подбором ширины двухпроводной линии, из-за чего возникает рассогласование.

Макет АР. Поскольку коэффициент использования площади (КИП) одиночного излучателя меньше 1, дифракционные лепестки в АР подавляются не полностью. Однако в полосе частот 18...26 ГГц их уровень не превышает уровня первого бокового лепестка, составляющего -12 дБ. Из данных эксперимента следует, что период решетки, равный $3.25\lambda_{min}$, является слишком большим по критерию уровня дифракционных лепестков: на верхней частоте их уровень достигает -12 дБ. Уровень дифракционных лепестков можно несколько снизить, если уменьшить период решетки.

КИП антенны (e_a) в рабочей полосе частот выше 0.5 (рис. 15). КПД (η) у экспериментального образца равен примерно 0.5, а на верхней границе

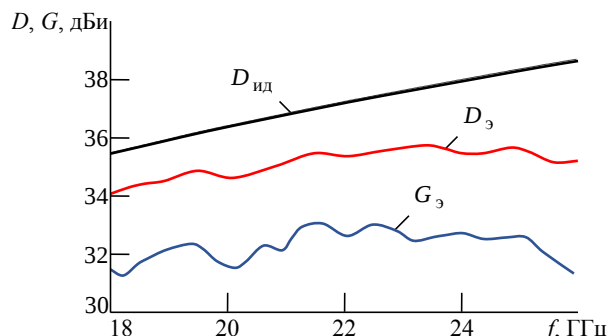


Рис. 14. Экспериментальные зависимости КНД и КУ антенны, КНД идеальной апертуры

Fig. 14. Experimental dependencies of the directivity (D_3) and gain (G_3) of the antenna, the directivity of an ideal aperture ($D_{ид}$)

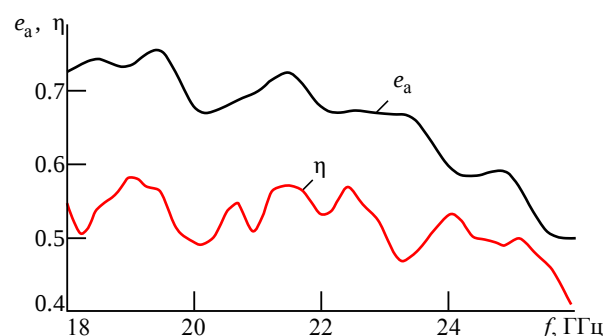


Рис. 15. Апертурный КИП и КПД антенны

Fig. 15. Aperture efficiency (e_a) and energy efficiency of the antenna (η)

диапазона падает до 0.25. КИП может быть повышен путем уменьшения периода решетки, а для повышения КПД требуется использование материалов с более низкими потерями.

Закключение. Рассмотренная в статье АР позволяет перекрыть стандартный IEEE-диапазон 18...26 ГГц, при этом КИП в полосе частот превышает 0.5, а уровень боковых и дифракционных лепестков не превосходит -12 дБ. Применение гибридной ДОС на основе печатной двухпроводной и волноводной линий позволяет сократить потери в печатной линии передач. Общий КПД экспериментального макета оказался относительно низким, что может быть исправлено применением диэлектрика с более низкими потерями для изготовления линз (например, полистирола).

Суммарная толщина всей системы составила 50 мм, что равно $4.3\lambda_{min}$. Если из конструкции исключить волноводную часть, толщина может быть уменьшена до $2.5\lambda_{min}$, что обеспечивает компактность АР при широкой полосе рабочих частот.

Список литературы

1. Pi Z., Khan F. An Introduction to Millimeter-Wave Mobile Broadband Systems // IEEE Communications Magazine. 2011. Vol. 49, iss. 6. P. 101–107. doi: 10.1109/MCOM.2011.5783993
2. Moving Towards Mmwave-Based Beyond-4G (B-4G) Technology / M. Cudak, A. Ghosh, T. Kovarik, R. Ratasuk, T. A. Thomas, F. W. Vook, P. Moorut // 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conf. Dresden, Germany, 2–5 June 2013. Piscataway: IEEE, 2013. P. 1–5. doi: 10.1109/VTCSpring.2013.6692638
3. A Survey on Access Technologies for Broadband Optical and Wireless Networks / R. Q. Shaddadab, A. B. Mohammada, S. A. Al-Gailaniac, A. M. Al-hetarb, M. A. Elmagzouba // J. of Network and Computer Applications. 2014. Vol. 41. P. 459–472. doi: 10.1016/j.jnca.2014.01.004
4. Distributed Earth Satellite Systems: What is Needed to Move Forward? / D. Selva, A. Golkar, O. Korobova, I. Lluhi Cruz, P. Collopy, O. L. de Weck // J. of Aerospace Information Systems. 2017. Vol. 14, № 8. P. 412–438. doi: 10.2514/1.1010497
5. Alexandrin A. M. Implementation of a Radially Inhomogeneous Medium and Construction of the Aperture Antennas on its Basis // 2013 Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON 2013). Krasnoyarsk, Russia, 12–13 Sept. 2013. Piscataway: IEEE, 2013. doi: 10.1109/SIBCON.2013.6693593
6. Alexandrin A. M., Ryazantsev R. O., Salomatov Yu. P. Numerical Optimization of the Discrete Mikaelian Lens // 2016 Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON 2016). Moscow, Russia, 12–14 May 2016. Piscataway: IEEE, 2016. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491859
7. Александрин А. М., Саломатов Ю. П. Широкополосная антенная решетка с использованием структур из искусственного неоднородного диэлектрика // Докл. Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 2 (26). С. 7–10.
8. Munk B. A. Finite Antenna Arrays and FSS. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2003. 392 p.
9. Gross F. B. Frontiers in Antennas: Next Generation Design & Engineering. New York: McGraw-Hill, 2011. 526 p.
10. Volakis J. L. Antenna Engineering Handbook. New York: McGraw-Hill, 2007. 1754 p. doi: 10.1002/9780471730071.ch1
11. Lee J. J., Livingston S., Nagata D. A Low Profile 10:1 (200–2000 MHz) Wide Band Long Slot Array // 2008 IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp. San Diego, CA, USA, 5–11 July 2008. Piscataway: IEEE, 2008. Vol. 1. P. 61–64. doi: 10.1109/APS.2008.4619302
12. Design of a Cylindrical Long-Slot Array Antenna Integrated with Hybrid EBG/Ferrite Ground Plane / H. S. Youn, Y. L. Lee, N. Celik, M. F. Iskander // IEEE Antennas Wireless Propagation Lett. 2012. Vol. 11. P. 180–183. doi: 10.1109/LAWP.2012.2186782
13. Lenses Designed by Transformation Electromagnetics and Fabricated by 3D Dielectric Printing / J. Yi, A. de Lustrac, G.-P. Piau, S. N. Burokur // 2016 IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. (APSURSI 2016). Fajardo, Puerto Rico, 26 June–1 July 2016. Piscataway: IEEE, 2016. P. 1385–1386. doi: 10.1109/APS.2016.7696399
14. Котляр В. В., Мелехин А. С. Преобразование Абеля в задачах синтеза градиентных оптических элементов // Компьютерная оптика. 2002. № 3. С. 29–36.
15. Триандафилов Я. Р., Котляр В. В. Фотонно-кристаллическая линза Микаэляна // Компьютерная оптика. 2007. Т. 31, № 3. С. 27–31.

Информация об авторах

Александрин Антон Михайлович – магистр по направлению "Радиотехника" (2009), аспирант, старший преподаватель кафедры "Радиотехника" Сибирского федерального университета. Автор 20 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства; широкополосные антенны и антенные решетки. Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, г. Красноярск, 660041, Россия
E-mail: aalexandrin@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8428-5562>

Саломатов Юрий Петрович – кандидат технических наук (1982), профессор (2013) кафедры "Радиотехника" Сибирского федерального университета. Автор 240 научных работ. Сфера научных интересов – ФАР; ЦФАР; квазиоптические антенны и антенные решетки. Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, г. Красноярск, 660041, Россия
E-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4309-226X>

References

1. Pi Z., Khan F. An Introduction to Millimeter-Wave Mobile Broadband Systems. IEEE Communications Magazine. 2011, vol. 49, iss. 6, pp. 101–107. doi: 10.1109/MCOM.2011.5783993
2. Cudak M., Ghosh A., Kovarik T., Ratasuk R., Thomas T. A., Vook F. W., Moorut P. Moving Towards Mmwave-Based Beyond-4G (B-4G) Technology. 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conf. Dresden, Germany, 2–5 June 2013. Piscataway, IEEE, 2013, pp. 1–5. doi: 10.1109/VTCSpring.2013.6692638
3. Shaddadab R. Q., Mohammada A. B., Al-Gailaniac S. A., Al-hetarb A. M., Elmagzouba M. A. A Survey on

Access Technologies for Broadband Optical and Wireless Networks. J. of Network and Computer Applications. 2014, vol. 41, pp. 459–472. doi: 10.1016/j.jnca.2014.01.004

4. Selva D., Golkar A., Korobova O., Lluch i Cruz I., Collopy P., de Weck O. L. Distributed Earth Satellite Systems: What is Needed to Move Forward? J. of Aerospace Information Systems. 2017, vol. 14, no. 8, pp. 412–438. doi: 10.2514/1.I010497

5. Alexandrin A. M. Implementation of a Radially Inhomogeneous Medium and Construction of the Aperture Antennas on its Basis. 2013 Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON 2013). Krasnoyarsk, Russia, 12–13 Sept. 2013. Piscataway, IEEE, 2013. doi: 10.1109/SIBCON.2013.6693593

6. Alexandrin A. M., Ryazantsev R. O., Salomatov Y. P. Numerical Optimization of the Discrete Mikaelian Lens. 2016 Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON 2016). Moscow, Russia, 12–14 May 2016. Piscataway, IEEE, 2016. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491859

7. Aleksandrin A. M., Salomatov Yu. P. Wideband Antenna Array with the Use of Artificial Inhomogeneous Dielectric Structures. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Proc. of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics]. 2012, no. 2 (26), pp. 7–10. (In Russ.)

8. Munk B. A. Finite Antenna Arrays and FSS. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2003, 392 p.

9. Gross F. B. Frontiers in Antennas: Next Generation Design & Engineering. New York, McGraw-Hill, 2011, 526 p.

10. Volakis J. L. Antenna Engineering Handbook. New York, McGraw-Hill, 2007, 1754 p. doi: 10.1002/9780471730071.ch1

11. Lee J. J., Livingston S., Nagata D. A Low Profile 10:1 (200–2000 MHz) Wide Band Long Slot Array. 2008 IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp. San Diego, CA, USA, 5–11 July 2008. Piscataway, IEEE, 2008, vol. 1, pp. 61–64. doi: 10.1109/APS.2008.4619302

12. Youn H. S., Lee Y. L., Celik N., Iskander M. F. Design of a Cylindrical Long-Slot Array Antenna Integrated with Hybrid EBG/Ferrite Ground Plane. IEEE Antennas Wireless Propagation Lett. 2012, vol. 11, pp. 180–183. doi: 10.1109/LAWP.2012.2186782

13. Yi J., de Lustrac A., Piau G.-P., Burokur S. N. Lenses Designed by Transformation Electromagnetics and Fabricated by 3D Dielectric Printing. 2016 IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. (APSURSI 2016). Fajardo, Puerto Rico, 26 June–1 July 2016. Piscataway, IEEE, 2016, pp. 1385–1386. doi: 10.1109/APS.2016.7696399

14. Kotlyar V. V., Meljohin A. S. Abel Transform in Synthesis of Gradient Optical Elements. Computer Optics. 2002, no. 3, pp. 29–36. (In Russ.)

15. Triandafilov Ya. R., Kotlyar V. V. Photonic Crystal Mikaelian Lens. Computer Optics. 2007, vol. 31, no. 3, pp. 27–31. (In Russ.)

Information about the authors

Anton M. Aleksandrin, Master's degree in Radio Engineering (2009), postgraduate, senior lecturer of Radio Engineering Department of the Siberian Federal University (SFU). The author of 20 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; wideband antennas and antenna arrays.

Address: Siberian Federal University, 79 Svobodny Str., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: aalexandrin@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8428-5562>

Yury P. Salomatov, Cand. Sci. (Eng.) (1982), Professor (2013) of Department of Radio Engineering of the Siberian Federal University. The author of 240 scientific publications. Area of expertise: phased arrays; digital phased arrays; quasi-optical antennas and antenna arrays.

Address: Siberian Federal University, 79 Svobodny Str., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4309-226X>

Моделирование и практическая реализация широкополосной двухгребневой рупорной антенны с шириной рабочей полосы более октавы и высоким уровнем кроссполяризационной развязки

В. В. Мещеряков✉, Н. В. Маркова, П. Д. Юрманов

ООО "Апстек Лабс", Санкт-Петербург, Россия

✉ mescheryakov.v.v@gmail.com

Аннотация

Введение. Для решения задачи радиополяриметрии в многопозиционных микроволновых досмотровых системах (ММДС) с апертурным синтезом необходимо использовать антенны с высоким уровнем кроссполяризационной развязки (КПР) в широком пространственном угле. Восстановление радиоизображений в ММДС происходит на дистанциях, соизмеримых с размерами апертуры антенных структур, поэтому значение пространственного угла, в котором необходимо выполнение требования высокой КПР, может достигать 30°. Таким образом, возникает новая задача создания антенной структуры X- и Ku-диапазонов, применение которой в ММДС позволило бы решить задачу построения радиоизображения деполяризованного микроволнового излучения, рассеянного скрытыми опасными объектами на теле человека.

Цель работы. Разработка приемной антенны жесткой конструкции для долговременной эксплуатации в ММДС с уровнем КПР 28 дБ при пространственном угле 30° и рабочих частотах 8... 20 ГГц.

Материалы и методы. Определены требования для приемной антенны в ММДС. Приведены теоретические обоснования для выбора конструкции антенны. В разработанной ММДС для построения микроволнового изображения используется апертурный синтез. Представлены этапы и результаты моделирования широкополосных двухгребневых антенн в программе трехмерного моделирования электромагнитного поля CST Studio. Рассмотрены результаты моделирования двухгребневых антенн: пирамидальной, конической, в круглом и эллиптическом волноводах. Произведено сравнение результатов измерения в безэховой камере для макета полученной антенны и результатов моделирования.

Результаты. Разработана и изготовлена двухгребневая эллиптическая антенна жесткой конструкции, с КСВН не более 2 и кроссполяризационной развязкой в пространственном угле 30° не менее 28 дБ в диапазоне частот, перекрывающем октаву.

Заключение. Антенна может быть использована в ММДС для детектирования эффекта деполяризации микроволнового излучения скрытыми опасными объектами на теле человека. Высокое значение КПР антенны в широком пространственном угле позволит в дальнейшем внедрить микроволновую поляриметрию в ММДС.

Ключевые слова: двухгребневая рупорная антенна, кроссполяризационная развязка, эллиптическая двухгребневая антенна

Для цитирования: Мещеряков В. В., Маркова Н. В., Юрманов П. Д. Моделирование и практическая реализация широкополосной двухгребневой рупорной антенны с шириной рабочей полосы более октавы и высоким уровнем кроссполяризационной развязки // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 5. С. 42–51. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-42-51

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 03.06.2019; принята к публикации после рецензирования 29.09.2019; опубликована онлайн 29.11.2019

Modeling and Practical Implementation of a Broadband Double-Ridged Horn Antenna with an Operating Range More Than an Octave and a High Level of Cross-Polarization Discrimination

Viktor V. Meshcheriakov✉, Natalia V. Markova, Pavel D. Iurmanov

Apstec Labs LTD, Saint Petersburg, Russia

✉ mescheryakov.v.v@gmail.com

Abstract

Introduction. The resolution of the problem of radio polarimetry in multiposition microwave screening systems (MMSS) with aperture synthesis requires the use of antennas with a high level of cross-polarization discrimination (XPD) in a wide spatial angle. The radio images are reconstructed in MMSS at distances commensurate with the aperture of the antenna structures. Therefore, the value of the spatial angle, at which high XPD is required, can reach 30°. This leads to a new problem of creating an antenna configuration of the X and Ku band, the application of which in MMSS will resolve the problem of constructing a radio image of depolarized microwave radiation scattered on the human body in the form of hidden dangerous objects.

Aim. To develop a double-ridged receiving antenna for long-term operation in MMSS with an XPD level of 28 dB at a spatial angle of 30° and operating frequencies of 8...20 GHz.

Materials and methods. The requirements for the receiving antenna in MMSS were determined. Theoretical justifications were proposed for the choice of antenna design. Aperture synthesis was used to construct microwave images in MMSS. The stages and results of modelling broadband double-ridge antennas were presented using the CST Studio software broadly applied for three-dimensional electro-magnetic field modelling. The results of modelling pyramidal and conical double-ridged antennas, as well as those in circular and elliptical waveguides, were analyzed. The designed antenna was tested in an anechoic chamber. The measurement results were compared with those obtained during simulation.

Results. An elliptical double-ridged horn antenna with a VSWR of no more than 2 and cross-polarization discrimination in a spatial angle of 30° of no less than 28 dB for the frequency range that covers an octave was designed and constructed.

Conclusion. The developed antenna can be used in MMSS for the purpose of detecting the effect of microwave radiation depolarization as hidden dangerous objects on a human body. Such characteristics of the antenna as its high XPD value in a wide spatial angle will allow the future introduction of microwave polarimetry in MMSS.

Key words: double-ridged horn antenna, cross-polarisation discrimination, double-ridged elliptical antenna

For citation: Meshcheriakov V. V., Markova N. V., Iurmanov P. D. Modeling and Practical Implementation of a Broadband Double-Ridged Horn Antenna with an Operating Range More Than an Octave and a High Level of Cross-Polarization Discrimination. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 5, pp. 42–51. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-42-51

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

Submitted 03.06.2019; accepted 29.09.2019; published online 29.11.2019

Введение. В последнее время в многопозиционных микроволновых досмотровых системах (ММДС) для выявления металлических предметов на теле человека часто применяются кросс-поляризационные методы [1]. ММДС, показанная на рис. 1 в месте эксплуатации, предназначена для непрерывного сканирования потока людей на наличие скрытых взрывных устройств и автоматического оружия на теле человека и в рюкзаках.

Она использует метод радиолокационной поляриметрии [2, 3], в котором для получения полной информации о рассеянном от цели поле применяются широкополосные двухгребневые антенны [4, 5]. Для получения достоверных результатов используемые антенные структуры должны иметь высокий уровень кроссполяризационной развязки (КПР) [6, 7], что для частотного диапазона с перекрытием более октавы является сложной техни-

Моделирование и практическая реализация широкополосной двухгребневой рупорной антенны с шириной рабочей полосы более октавы и высоким уровнем кроссполяризационной развязки
Modeling and Practical Implementation of a Broadband Double-Ridged Horn Antenna with an Operating Range More Than an Octave and a High Level of Cross-Polarization Discrimination



Рис. 1. Многопозиционная микроволновая досмотровая система в месте эксплуатации

Fig. 1. Multiposition microwave inspection system (MMIS) at the place of operation

ческой задачей [8, 9]. Под КПП (Cross Polar Discrimination – CPD [10]) подразумевается минимальное отношение амплитуд линейных компонентов электромагнитного поля основной и кроссполаризаций, определенных в системе координат Ludwig-3 [11], для заданного пространственного угла.

В разрабатываемой авторами настоящей статьи ММДС для построения микроволнового изображения используется апертурный синтез. Существенным ограничением для построения радиоизображения в ортогональной поляризации [1] является неудовлетворительное значение КПП используемой антенны.

При проведении эксперимента, описанного в [1], установлено минимальное значение КПП для задачи классификации опасных объектов на теле человека: 5.0 – в основной поляризации и 0.2 – в кроссполаризации, что составляет 28 дБ. Для разрабатываемой ММДС [12] необходимо, чтобы это значение выдерживалось при детектировании в зоне анализа отраженного излучения (рис. 2, 3).

Разрабатываемая многопозиционная система (рис. 2) состоит из двух антенных массивов, расположенных под углом 45° к оси X. Зона досмотра включает зону анализа прошедшего излучения 2 и зону анализа отраженного излучения 3 [13]. Из расположения и размеров зоны анализа отраженного излучения 3 следует, что требуемый пространственный угол, в котором должно выдерживаться заданное значение КПП, составляет как минимум 30° .

В первой версии ММДС [12] применялись печатные антенны Вивальди (рис. 3), но в процессе разработки системы для обнаружения скрытых объектов методом анализа кроссполаризационного рассеяния выявлено, что КПП данных антенн не удовлетворяет необходимым требованиям, так как ее уровень в угле 30° составляет всего лишь 4 дБ

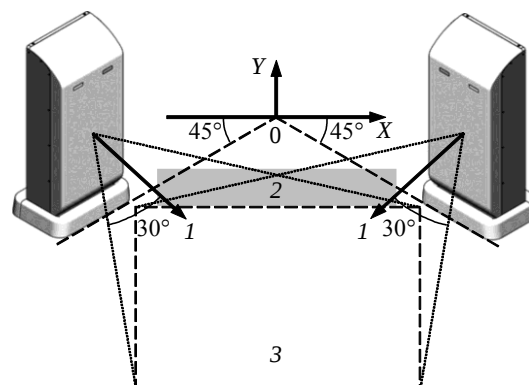


Рис. 2. Схема расположения ММДС:

1 – направление главных лепестков передающих антенн в массиве; 2 – зона анализа прошедшего излучения; 3 – зона анализа отраженного излучения

Fig. 2. MMIS location scheme:

1 – direction of the main lobes of the transmitting antennas in the array; 2 – zone of analysis of transmitted radiation; 3 – zone of analysis of reflected radiation

при линейно поляризованном излучении. В пространственном угле свыше 30° на частотах выше 14 ГГц у данной антенны начинает преобладать кросскомпонент и значение развязки падает до –10 дБ. Такие параметры не позволяют использовать данную антенну для определения скрытых опасных объектов, описанных в [1].

Остальные параметры антенны Вивальди в рабочем диапазоне 8...18 ГГц:

- коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН) менее 1.8;
- среднее значение коэффициента направленного действия (КНД) 9 дБи;

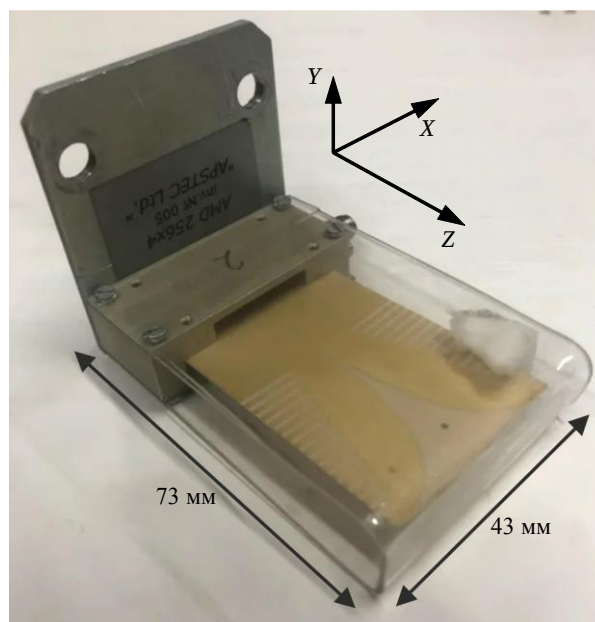


Рис. 3. Антенна Вивальди, используемая в ММДС

Fig. 3. Vivaldi antenna used in MMIS

– ширина главного лепестка по уровню 3 дБ в плоскости диэлектрической подложки xOz (E -плоскость) $70...60^\circ$, в ортогональной плоскости yOz (H -плоскость) $85...30^\circ$ в целом являются неудовлетворительными для систем с синтезом апертуры в пространственном угле 30° .

Помимо этого рассмотренная приемная антенна отличается хрупкостью и неустойчивостью конструкции, недостаточной повторяемостью электродинамических параметров от образца к образцу.

Цель работы. Разработка приемной антенны с высоким уровнем КПР, работающей в частотных диапазонах X и Ku , с помощью которой можно достоверно решить задачу восстановления радиоизображения в разрабатываемой ММДС для микроволнового излучения, деполаризованного при рассеянии скрытыми опасными объектами на теле человека.

В разрабатываемой приемной антенне должны быть достигнуты необходимые значения параметров, а также устранены отмеченные недостатки конструкции.

Методы исследования. Известны и применяются широкополосные структуры, разработанные на базе двухгребневых рупорных антенн [4, 5]. В [4] рассмотрен двухгребневый пирамидальный рупор, запитанный с помощью коаксиального кабеля, приведены размеры структуры и полученные для нее электродинамические параметры, но не указан уровень КПР. Для оценки этого параметра проведено электродинамическое моделирование двухгребневого пирамидального рупора с помощью CST STUDIO SUITE. Также с целью определения КПР в пространственном угле 30° промоделированы двухгребневые конический рупор и эллиптический волновод.

Для согласования антенн использовалась двухгребневая структура экспоненциальной формы

(рис. 4), заданная выражением

$$d(z) = y_1 + (y_2 - y_1) \frac{1 - e^{\alpha z}}{1 - e^{\alpha h}}, \quad (1)$$

где y_1, y_2 – координаты начала и конца экспоненциальной части двухгребневой структуры; α – коэффициент экспоненты; h – длина рупора. Двухгребневые структуры рассмотренных антенн запитывались коаксиальным кабелем с волновым сопротивлением 50 Ом.

Проведем оценку размеров раскрыва для пирамидального рупора. Согласно [14] H -образный волновод, формируемый двумя гребнями в прямоугольном волноводе, имеет более низкую критическую частоту для волны основного типа H_{10} в сравнении с прямоугольным волноводом. Тип волны H_{10} также является основным для пирамидального рупора. Экспоненциальная форма гребней обеспечивает согласование H -образного волновода и раскрыва пирамидального рупора прямоугольной формы. Воспользуемся для оценки взаимосвязи размеров апертуры и коэффициента направленности формулой для волны H_{10} в пирамидальном рупоре [15]:

$$D = 0.64(4\pi ab/\lambda^2),$$

где a и b – поперечные размеры раскрыва.

Согласно [16] ширина диаграммы направленности (ДН) в E -плоскости yOz BW_E и H -плоскости xOz связана с размерами рупора соотношениями

$$a = 53\lambda/BW_E; \quad b = 53\lambda/BW_H.$$

Тогда требуемый КНД 10 дБи при средней частоте 13 ГГц для главного лепестка шириной 60° можно получить для размеров $a = 22$ мм и $b = 30$ мм.

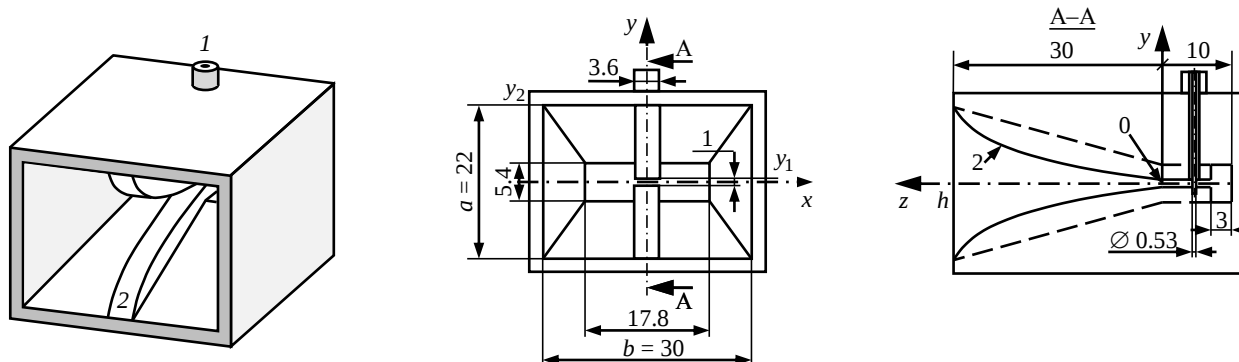


Рис. 4. Модель двухгребневого пирамидального рупора:

1 – 50-омный коаксиальный волновод с фторопластовым изолятором; 2 – металлический гребень экспоненциальной формы

Fig. 4. Double-ridged pyramidal horn model:

1 – 50-ohm coaxial waveguide with fluoroplastic insulator; 2 – exponential metal arris

В коническом рупоре благодаря двухгребневой структуре внутри раскрыва на выходе антенны (в сечении $\varnothing c$ на рис. 6) формируется волна типа H_{11} . Рассмотрим упрощенную модель излучения круглого волновода, возбужденного на волне H_{11} [15], для определения предельных размеров апертуры, необходимой для формирования коэффициента направленного действия, равного КНД ранее используемой антенны Вивальди. При ограничении размеров круглого волновода в пределах

$$c/\lambda = 0.6 \dots 1.3 \quad (2)$$

для КНД справедлива формула

$$D = (\pi c/\lambda)^2 \frac{(1 + \sqrt{1 - 1.154\lambda/c})^2}{4.775\sqrt{1 - 1.54\lambda/c}}, \quad (3)$$

где c – диаметр раскрыва рупора; λ – длина волны электромагнитного излучения. Таким образом, для средней частоты диапазона 13 ГГц и КНД 10 дБи необходимо иметь $c = 25$ мм.

Моделирование. На рис. 4 приведена анализируемая модель двухгребневого пирамидального рупора. Форма гребня 2 определена (1), при этом

размеры $a = 22$ мм и $b = 30$ мм выбраны для получения требуемого КНД в соответствии с (3).

Для этой модели получены частотные зависимости КСВН (рис. 5, б) и КПР в пространственном угле 30° (рис. 5, а) для различных значений коэффициента α . На приведенных графиках видно, что коэффициент α существенно влияет на уровень КПР, при этом КСВН для всех приведенных значений α не превосходит 2. Оптимальным для данной задачи является значение $\alpha = -0.1$, однако полученный при этом значении уровень КПР не менее 18 дБ не удовлетворяет заявленному требованию 28 дБ, а погрешности производства еще больше ухудшат этот параметр.

Поэтому было принято решение исследовать конический рупор. На рис. 6 приведена исследуемая модель конической двухгребневой рупорной антенны, состоящая из двух частей: самого рупора с апертурой диаметром c и круглого волновода радиусом 8 мм. Гребневая структура имеет экспоненциальную форму ребер $d(z)$, заданную (1). Для улучшения согласования гребни скошены со стороны короткозамыкающей стенки.

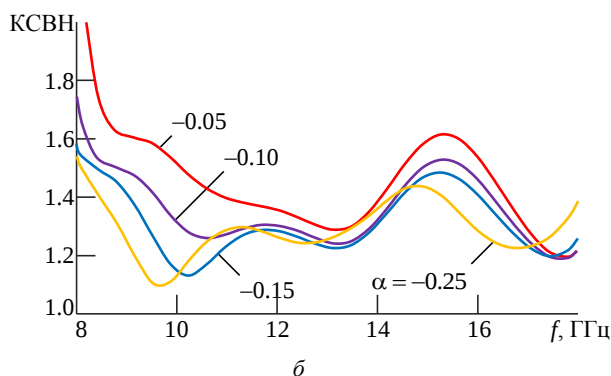
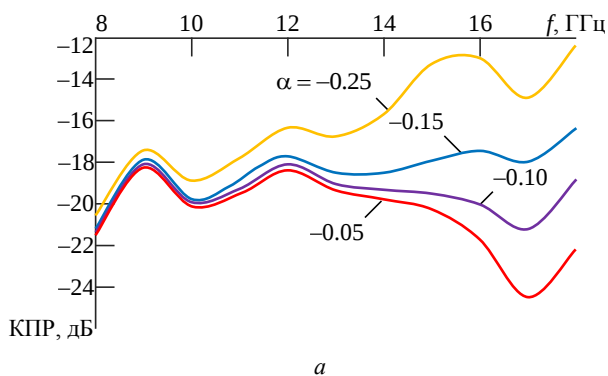


Рис. 5. Частотные зависимости параметров пирамидального рупора: а – КПР; б – КСВН в пространственном угле 30°

Fig. 5. Frequency dependences of the parameters of the pyramidal horn:
а – cross-polarization discrimination (CPR); б – VSWR in a spatial angle of 30°

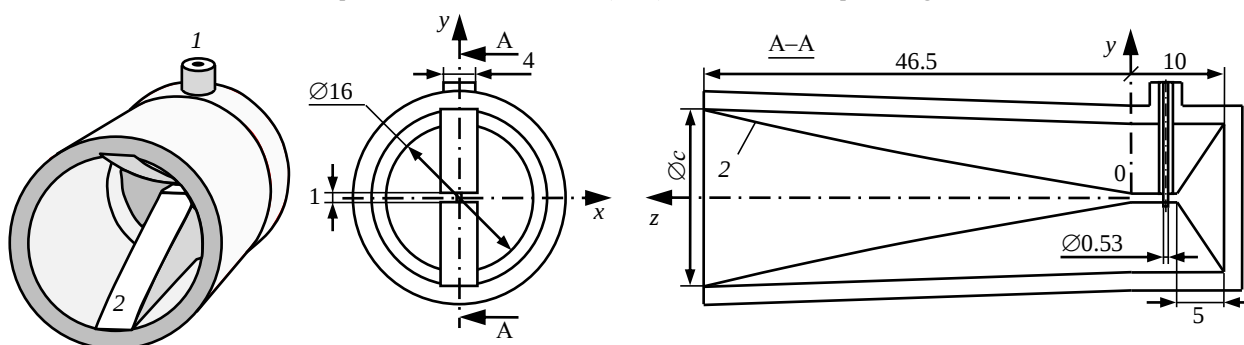


Рис. 6. Модель двухгребневого конического рупора:

1 – 50-омный коаксиальный волновод с фторопластовым изолятором; 2 – металлический гребень экспоненциальной формы

Fig. 6. Double-ridged cone horn model:

1 – 50-ohm coaxial waveguide with fluoroplastic insulator; 2 – exponential metal arris

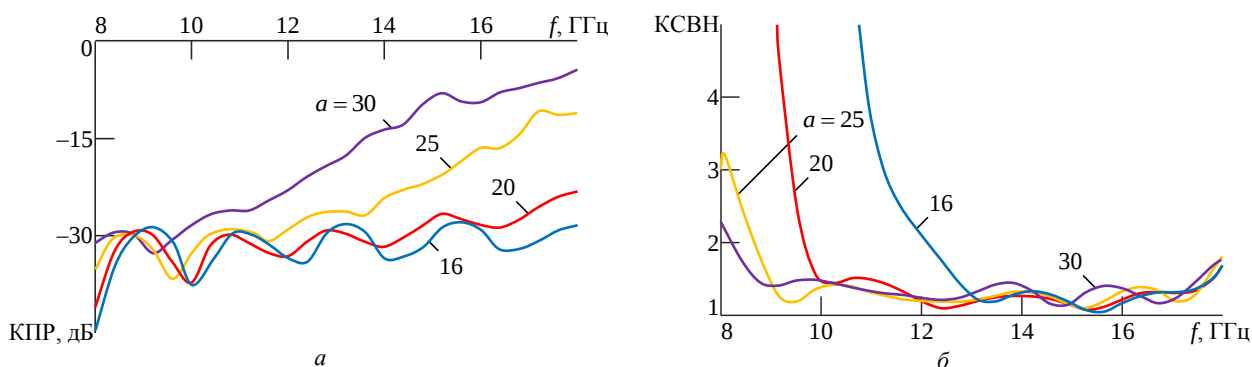


Рис. 7. Частотные зависимости параметров конического рупора: *a* – КПР в пространственном угле 30°; *b* – КСВН

Fig. 7. Frequency dependences of the parameters of the conic horn: *a* – CPR in a spatial angle of 30°; *b* – VSWR

Согласно ограничениям, установленным (2), рассчитаны значения КСВН и КПР в пространственном угле 30° для диаметра рупора 16, 20, 25 и 30 мм (рис. 7).

Согласно результатам моделирования, модель двухгребневой конической антенны имеет КСВН не более 2 в области верхних частот и КПР не менее 25 дБ в полосе частот с перекрытием по диапазону, равным 1.8. КНД на частоте 13 ГГц для раскрыва $c = 25$ мм соответствует значению 10 дБи, рассчитанному по (3). При этом на зависимости КПР от частоты (рис. 7, *a*) видно, что при диаметре раскрыва более 20 мм она существенно ухудшается. Это происходит из-за расфазировки конического рупора: при больших значениях диаметра раскрыва фазовое распределение в апертуре антенны будет отлично от равномерного, т. е. несинфазное. Исходя из приведенных на рис. 7 результатов, необходимый уровень КПР в пространственном угле 30° достигается при уменьшении размера апертуры до 16 мм. Необходимо отметить, что приближение апертуры к размеру круглого волновода невозможно, так как в этом случае увеличивается минимальная рабочая частота антенны.

Требуемые электродинамические и конструктивные параметры также возможно получить в двух-

гребневой антенне, разработанной на базе волновода эллиптического сечения. Эллиптическая форма волновода устраняет вырождение типа волны H_{11} , характерное для круглого волновода, и обеспечивает фиксацию плоскости поляризации [17].

Авторами сделано предположение, что расположение гребней вдоль малой оси эллиптического волновода улучшит значение КПР в пространственном угле 30°. На рис. 8 приведена 3D-модель эллиптической двухгребневой антенны (1 – 50-омный коаксиальный кабель с фторопластовым изолятором, оканчивающийся SMA-разъемом).

На рис. 9, 10 показаны частотные зависимости КСВН, КПР в пространственном угле 30°, ширина ДН в *E*- и *H*-плоскостях BW_E и BW_H , а также КНД. Приведенные результаты получены при следующих размерах эллиптической антенны:

- поперечные размеры эллиптического волновода в плоскости раскрыва $a_{эл} \times b_{эл} = 11 \times 7$ мм², где $a_{эл}$ и $b_{эл}$ – большая и малая полуоси эллипса соответственно;

- толщина гребня 3.4 мм;
- ширина щели в месте запитки 1 мм;
- длина антенны 68 мм.

Коническая внешняя форма антенны снижает

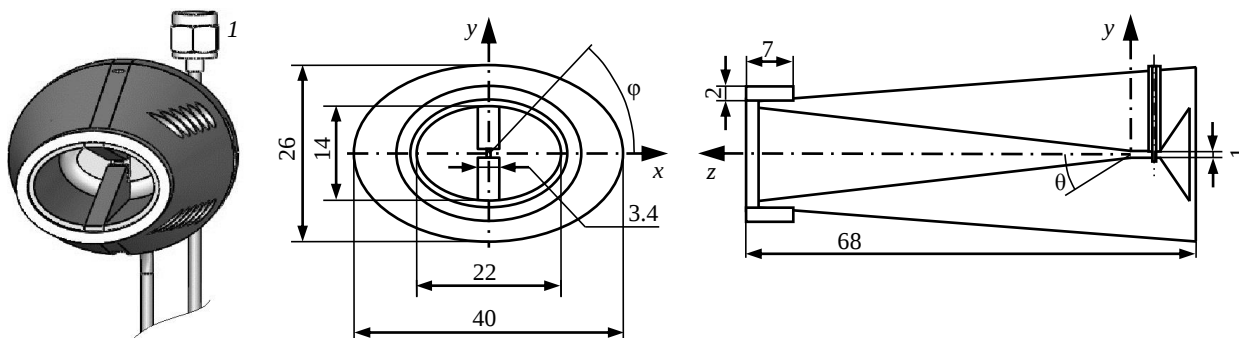


Рис. 8. Модель эллиптической двухгребневой антенны: 1 – 50-омный коаксиальный волновод с фторопластовым изолятором

Fig. 8. Model of an elliptical double-ridged antenna: 1 – 50-ohm coaxial waveguide with fluoroplastic insulator

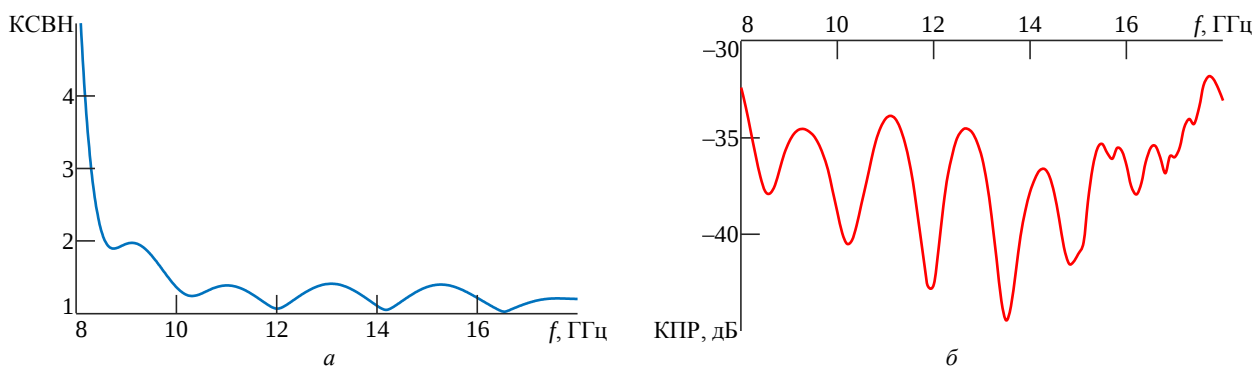


Рис. 9. Частотные зависимости параметров эллиптической двухгребневой антенны: a – КСВН; b – КПР в пространственном угле 30°
Fig. 9. Frequency dependences of the parameters of the elliptical double-rib antenna: a – VSWR; b – CPR in a spatial angle of 30°

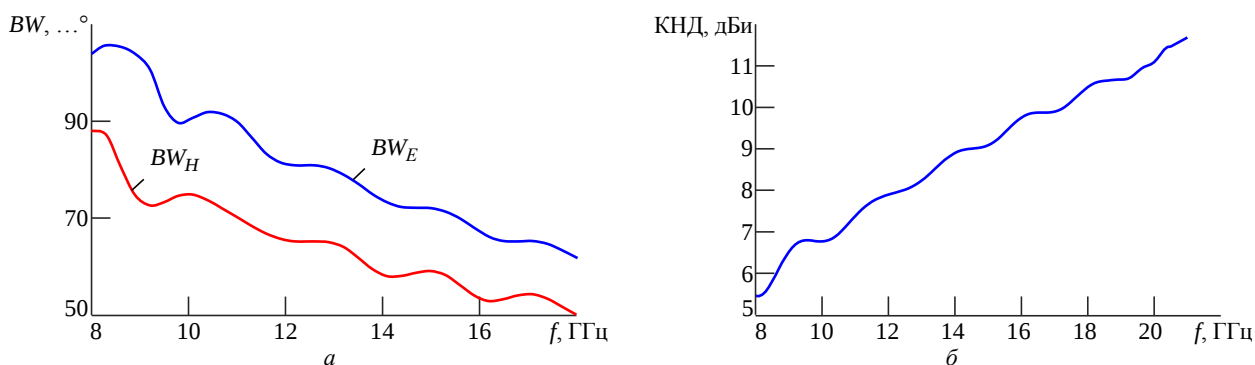


Рис. 10. Частотные зависимости параметров эллиптической двухгребневой антенны: a – ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ в E - и H -плоскостях; b – КНД

Fig. 10. Frequency dependences of the parameters of the elliptical double-rib antenna: a – beam width in level -3 dB in E -plane and H -plane; b – directional coefficient

уровень приема ее апертурой посторонних излучений по сравнению с антенной цилиндрической формы. Увеличение размера на правом торце антенны добавило жесткости и устойчивости всей конструкции.

В плоскости раскрыва антенны находится небольшое фторопластовое кольцо, которое согласно результатам моделирования позволяет значительно снизить уровень кроссполаризационного излучения в нижней части диапазона частот.

Моделирование эллиптической двухгребневой антенны дало следующие ее параметры:

- КСВН ≤ 2 ;
- КПР в пространственном угле 30° не менее 30 дБ в диапазоне частот с перекрытием 2.2;
- ширина главного лепестка и КНД удовлетворяют необходимым требованиям для обеспечения приема сигнала от цели в зоне анализа отраженного микроволнового излучения (см. рис. 2, 3).

Результаты. На рис. 11, a показан макет изготовленной двухгребневой эллиптической антенны. Результаты исследования ее электродинамических параметров в плоскости, задаваемой углом φ (см. рис. 8, b), приведены на рис. 12. Распределение КПР построено в зависимости от угла отклонения θ от оси симметрии антенны (см. рис. 8, $в$).

Для сохранения уровня КПР при формировании ансамбля приемных эллиптических двухгребневых антенн необходимо использование поглощающего материала, например ECCOSORB VHP-2-NRL. На рис. 11, b представлена фотография антенны в массиве поглотителя ECCOSORB VHP-2 в безэховой камере, где были проведены измерения [18]. Анализ результатов экспериментальных исследований разработанной и изготов-

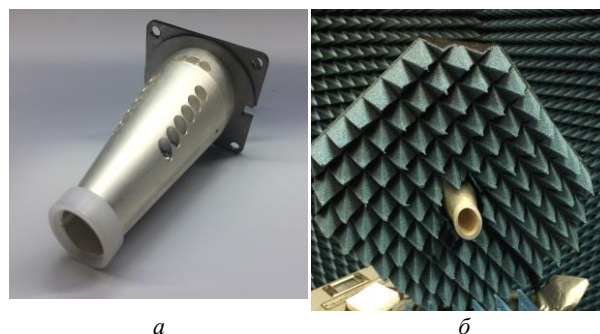


Рис. 11. Эллиптическая двухгребневая антенна: a – макет; b – установка в массив поглотителя ECCOSORB VHP-2-NRL

Fig. 11. Elliptical double-rib antenna: a – layout; b – installation in the array of the absorber ECCOSORB VHP-2-NRL

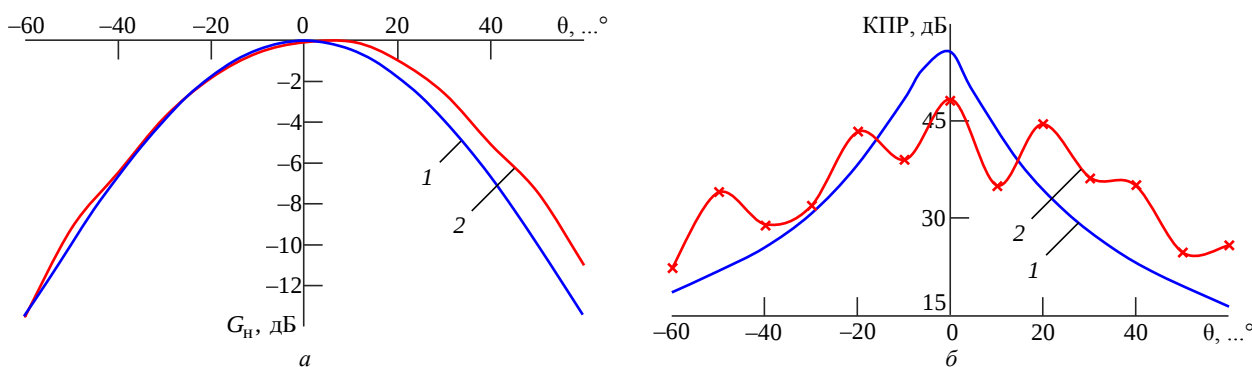


Рис. 12. Теоретические 1 и экспериментальные 2 зависимости параметров эллиптической двухгребневой антенны на частоте 18 ГГц в плоскости $\varphi = 45^\circ$:

a – нормированный на максимальное значение коэффициент усиления; b – КПП

Fig. 12. Theoretical 1 and experimental 2 dependences of the parameters of an elliptical double-rib antenna at a frequency of 18 GHz in the plane $\varphi = 45^\circ$: a – normalized to maximum value gain; b – CPR

ленной эллиптической двухгребневой антенны показывает, что полученные экспериментальные данные и результаты моделирования хорошо коррелированы. Значение КПП изготовленной антенны на частоте 18 ГГц в пространственном угле 30° не менее 30 дБ, при понижении частоты уровень развязки увеличивается. Это полностью согласуется с результатами моделирования и позволяет применять антенны в ММДС.

Заключение. Разработана и изготовлена двухгребневая эллиптическая антенна жесткой конструкции, с КСВН ≤ 2 и КПП в пространственном угле 30° не менее 28 дБ в диапазоне частот, пере-

крывающем октаву. Антенна может быть использована в ММДС для детектирования эффекта деполяризации микроволнового излучения скрытыми опасными объектами на теле человека. Конструктивно двухгребневая антенна собирается из трех частей – верхней и нижней половин эллиптического волновода и двухгребневой пластины, которые соединяются в одно целое с помощью винтов. Такая конструкция обеспечивает удовлетворение жестких конструктивных допусков, задаваемых моделированием, однако при изготовлении требует высокой культуры производства.

Список литературы

1. Григорьев А. Д., Мещеряков В. В., Семенов С. Н. Исследование эффекта изменения поляризации микроволнового излучения скрытыми объектами на теле человека // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2015. № 6. С. 41–45.
2. Cameron W. L., Youssef N. N., Leung L. K. Simulated Polarimetric Signatures of Primitive Geometrical Shapes // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1996. Vol. 34, № 3. P. 793–803. doi: 10.1109/36.499784
3. Touzi R., Charbonneau F. Characterization of Target Symmetric Scattering Using Polarimetric SARs // IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing. 2002. Vol. 40, № 11. P. 2507–2516. doi: 10.1109/TGRS.2002.805070
4. Design and Implementation of 0.7 to 7 GHz Broadband Double-Ridged Horn Antenna / H. Fallahi, M. Kaboli, S. A. Mirtaheri, A. Mehrdadian // 7th Intern. Symp. on Telecommunications (IST'2014). Tehran, Iran, 9–11 Sept. 2014, Piscataway: IEEE, 2014. P. 250–255. doi: 10.1109/ISTEL.2014.7000707
5. Paez C. I., Criollo E. H. Improved Broadband Double Ridged Horn Antenna without Split Radiation Pattern // IEEE Latin America Trans. 2016. Vol. 14, iss. 3. P. 1156–1161. doi: 10.1109/TLA.2016.7459593
6. Migliaccio M., Gambardella A., Tranfaglia M. SAR Polarimetry to Observe Oil Spills // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2007. Vol. 45, iss. 2. P. 506–511. doi: 10.1109/TGRS.2006.888097
7. Martorella M., Berizzi F., Bruscoli S. Use of Genetic Algorithms for Contrast Maximization and Entropy Minimization in ISAR Autofocusing // EURASIP J. on Applied Signal Processing. Vol. 2006. Article ID 87298. P. 1–11. doi: 10.1155/ASP/2006/87298
8. Jacobs O. B., Odendaal J. W., Joubert J. Elliptically Shaped Quad-Ridge Horn Antennas as Feed for a Reflector // IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2011. Vol. 10. P. 756–759. doi: 10.1109/LAWP.2011.2163050
9. Broadband Dual-Polarization Microstrip Antenna with High Cross-Polarization Isolation for SAR / Y. Ma, J. Hu, Y. Zhang, L. Li, L. Liu // 2018 China Intern. SAR Symp. (CISS). Shanghai, China, 10–12 Oct. 2018, Piscataway: IEEE, 2018. doi: 10.1109/SARS.2018.8551999
10. Stojce D. I. Global Mobile Satellite Communications Theory. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017. 599 p. doi: 10.1007/978-3-319-39171-7
11. Ludwig A. The Definition of Cross Polarization // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1973. Vol. 21, iss. 1. P. 116–119. doi: 10.1109/TAP.1973.1140406

12. Многопозиционная система построения микроволнового изображения в режиме реального времени / С. И. Воробьев, В. П. Аверьянов, М. Ю. Осипов, С. Н. Семенов // Сб. статей 13-й Междунар. науч.-практ. конф. "Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике". Санкт-Петербург, Россия, 24–26 мая 2012. С. 44–47.

13. Automatic standoff detection of threats in crowded areas / V. Averianov, A. Evsenin, I. Gorshkov, P. Iurmanov, A. Kuznetsov, G. Labzovsky, V. Meshcheryakov, M. Mokhova, S. Semenov, D. Vakhtin, I. Vorobev, S. Vorobyev, D. Kellermann // 9th Future Security. Security Research Conf. Proc., Berlin, Germany, 16–18 Sept. 2014. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2014. P. 322–329.

14. Analysis of Elliptical Ridged Waveguide / J. Xu, W. Wang, Y. Gong, Y. Weiz // 2006 Joint 31st Intern. Conf. on Infrared Millimeter Waves and 14th Intern. Conf. on Terahertz Elec-

tronics. Shanghai, China, 18–22 Sept. 2006. doi: 10.1109/ICIMW.2006.368473

15. Айзенберг Г. З., Ямпольский В. Г., Терешин О. Н. Антенны УКВ. Ч. 1. М.: Связь, 1977. 384 с.

16. Устройства СВЧ и антенны / Д. И. Воскресенский, В. Л. Гостюхин, В. М. Максимов, Л. И. Пономарев; под ред. Д. И. Воскресенского. 2-е изд. М.: Радиотехника, 2006. 376 с.

17. Tsogkas G. D., Roumeliotis J. A., Savaidis S. P. Cutoff Wavelengths of Elliptical Metallic Waveguides // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2009. Vol. 57, iss. 10. P. 2406–2415. doi: 10.1109/TMTT.2009.2029636

18. Nel M., Joubert J., Odendaal J. W. The Measurement of Complex Antenna Transfer Functions for Ultra-Wideband Antennas in a Compact Range // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2014. Vol. 56, iss. 6. P. 163–170. doi: 10.1109/MAP.2014.7011037

Информация об авторах

Мещеряков Виктор Владимирович – магистр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2013), старший инженер ООО "Апстек Лабс". Автор 18 научных работ. Сфера интересов – ВЧ-моделирование; алгоритмы радиовидения; прикладная физика; программирование ПЛИС и МК.

Адрес: ООО "Апстек Лабс", наб. Обводного канала, д. 199–201, корп. И, Санкт-Петербург, 190020, Россия

E-mail: mescheryakov.v.v@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4953-3671>

Маркова Наталья Владимировна – инженер по специальности "Радиофизика" (1975, Томский государственный университет), инженер ООО "Апстек Лабс". Сфера интересов – практическая электродинамика для антенных систем.

Адрес: ООО "Апстек Лабс", наб. Обводного канала, д. 199–201, корп. И, Санкт-Петербург, 190020, Россия

E-mail: nmarkova@apstelabs.com

Юрманов Павел Дмитриевич – магистр по направлению "Техническая физика" (2005), начальник производственного отдела ООО "Апстек Лабс". Автор трех научных публикаций. Сфера интересов – НЧ- и ВЧ-схемотехника; моделирование; разработка печатных плат.

Адрес: ООО "Апстек Лабс", наб. Обводного канала, д. 199–201, корп. И, Санкт-Петербург, 190020, Россия

E-mail: piurmanov@apstelabs.com

References

1. Grigoriev A. D., Meshcheryakov V. V., Semenov S. N. Investigation of polarization changing effect by hidden objects placed on a human body. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2015, no. 6, pp. 41–45. (In Russ.)

2. Cameron W. L., Youssef N. N., Leung L. K. Simulated Polarimetric Signatures of Primitive Geometrical Shapes. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1996, vol. 34, no. 3, pp. 793–803. doi: 10.1109/36.499784

3. Touzi R., Charbonneau F. Characterization of Target Symmetric Scattering Using Polarimetric SARs. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing. 2002, vol. 40, no. 11, pp. 2507–2516. doi: 10.1109/TGRS.2002.805070

4. Fallahi H., Kobo-li M., Mirtaheeri S. A., Mehrdadian A. Design and Implementation of 0.7 to 7 GHz Broadband Double-Ridged Horn Antenna. 7th Intern. Symp. on Telecommunications (IST'2014). 9–11 Sept. 2014, Tehran, Iran. Piscataway, IEEE, 2014, pp. 250–255. doi: 10.1109/ISTEL.2014.7000707

5. Paez C. I., Criollo E. H. Improved Broadband Double Ridged Horn Antenna without Split Radiation Pattern. IEEE Latin America Trans. 2016, vol. 14, iss. 3, pp. 1156–1161. doi: 10.1109/TLA.2016.7459593

6. Migliaccio M., Gambardella A., Tranfaglia M. SAR Polarimetry to Observe Oil Spills. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2007, vol. 45, iss. 2, pp. 506–511. doi: 10.1109/TGRS.2006.888097

7. Martorella M., Berizzi F., Bruscoli S. Use of Genetic Algorithms for Contrast Maximization and Entropy Minimization in ISAR Autofocusing. EURASIP J. on Applied Signal Processing. Vol. 2006, article ID 87298, pp. 1–11. doi: 10.1155/ASP/2006/87298

8. Jacobs O. B., Odendaal J. W., Joubert J. Elliptically Shaped Quad-Ridge Horn Antennas as Feed for a Reflector. IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2011, vol. 10, pp. 756–759. doi: 10.1109/LAWP.2011.2163050

9. Ma Y., Hu J., Zhang Y., Li L., Liu L. Broadband Dual-Polarization Microstrip Antenna with High Cross-Polarization Isolation for SAR. 2018 China Intern. SAR Symp. (CISS). Shanghai, China, 10–12 Oct. 2018. Piscataway, IEEE, 2018. doi: 10.1109/SARS.2018.8551999

10. Stojce D. I. Global Mobile Satellite Communications Theory. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017, 599 p. doi: 10.1007/978-3-319-39171-7

11. Ludwig A. The Definition of Cross Polarization. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1973, vol. 21, iss. 1, pp. 116–119. doi: 10.1109/TAP.1973.1140406

12. Vorobiev S. I., Averyanov V. P., Osipov M. Yu., Semenov S. N. Multi-Position System for Constructing a Microwave Image in Real Time. Collection of articles of the 13th intern. scien. and practical conf. “Fundamental and Applied Research, Development and Application of High Technologies in Industry and Economics”, St. Petersburg, Russia, May 24–26, 2012, pp. 44–47. (In Russ.)

13. Averianov V., Evsenin A., Gorshkov I., Iurmanov P., Kuznetsov A., Labzovsky G., Meshcheryakov V., Mokhova M., Semenov S., Vakhtin D., Vorobev I., Vorobyev S., Kellermann D. Automatic Standoff Detection of Threats in Crowded Areas. 9th Future Security. Security Research Conf. Proc., Berlin,

Germany, 16–18 Sept., 2014. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2014, pp. 322–329.

14. Xu J., Wang W., Gong Y., Weiz Y. Analysis of Elliptical Ridged Waveguide. 2006 Joint 31st Intern. Conf. on Infrared Millimeter Waves and 14th Intern. Conf. on Terahertz Electronics. Shanghai, China, 18–22 Sept. 2006. doi: 10.1109/ICIMW.2006.368473

15. Aizenberg G. Z., Yampolsky V. G., Tereshin O. N. Antennas VHF. Pt. 1. Moscow, Svyaz', 1977, 384 p. (In Russ.)

16. Voskresenskii D. I., Gostyukhin V. L., Maksimov V. M., Ponomarev L. I. Microwave Devices and Antennas; ed. by D. I. Voskresenskii. 2nd ed. Moscow, *Radio-tekhnika*, 2006, 376 p. (In Russ.)

17. Tsogkas G. D., Roumeliotis J. A., Savaidis S. P. Cutoff Wavelengths of Elliptical Metallic Waveguides. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2009, vol. 57, iss. 10, pp. 2406–2415. doi: 10.1109/TMTT.2009.2029636

18. Nel M., Joubert J., Odendaal J. W. The Measurement of Complex Antenna Transfer Functions for Ultra-Wideband Antennas in a Compact Range, IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2014, vol. 56, iss. 6, pp. 163–170. doi: 10.1109/MAP.2014.7011037

Information about the authors

Viktor V. Meshcheriakov – Master Sci. (2013) on Electronics and Nanoelectronics, Senior Engineer in Apstec Labs LTD. The author of 18 scientific publications. Area of expertise: high frequency modeling; radio vision algorithms; applied physics; FPGA programming.

Address: Apstec Labs LTD, 199–201 Nab. Obvodnogo kanala, Saint Petersburg 190020, Russia

E-mail: mescheryakov.v.v@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4953-3671>

Natalia V. Markova – Graduate Engineer on Radiophysics (1975, Tomsk State University), Engineer in Apstec Labs LTD. Area of expertise: practical electrodynamics for antenna systems.

Address: Apstec Labs LTD, 199–201 Nab. Obvodnogo kanala, Saint Petersburg 190020, Russia

E-mail: nmarkova@apsteclabs.com

Pavel D. Iurmanov – Master Sci. (2005) on Technical Physics, Head of Production in Apstec Labs LTD. The author of 3 scientific publications. Area of expertise: LF and HF circuitry; modeling; development of printed circuit boards.

Address: Apstec Labs LTD, 199–201 Nab. Obvodnogo kanala, Saint Petersburg 190020, Russia

E-mail: piurmanov@apsteclabs.com

Использование апостериорной информации при реализации систем радиолокационного распознавания с применением нейросетевых технологий

Д. Ф. Бескостый¹, С. Г. Боровиков¹, Ю. В. Ястребов¹, И. А. Созонтов²✉

¹ Научно-исследовательский центр ЦНИИ ВВС Минобороны России, Санкт-Петербург, Россия

² Военная академия воздушно-космической обороны, Тверь-22, Россия

✉ ilya.sozontov@gmail.com

Аннотация

Введение. Существующая в настоящее время необходимость получения актуальной, полной и достоверной информации о воздушных объектах определяет постоянное совершенствование современных систем радиолокационного распознавания (СРЛР), входящих в состав систем управления. Развитие современных СРЛР создает объективные предпосылки для использования прогрессивных и разработки новых методов и алгоритмов обработки сигналов с помощью нейронных сетей. Применение искусственных нейронных сетей, обладающих свойством обучаемости, позволяет расширить множество признаков распознавания за счет использования полученной в процессе контроля воздушного пространства информации.

Цель работы. Формулировка задачи и разработка предложений по использованию апостериорной информации для контроля воздушного пространства в системах радиолокационного распознавания при применении нейросетевых технологий.

Материалы и методы. На основе анализа структуры единого информационного пространства сформулирован подход к развитию СРЛР на основе обучающих технологий. С применением метода синтеза предложены примеры технических решений, позволяющие использовать современные методы и алгоритмы обработки сигналов на основе апостериорной информации, формируемой системой управления.

Результаты. Сформулированы принципы обучения нейронной сети при решении задачи распознавания в процессе функционирования радиоэлектронных средств (РЭС). Предложены технические решения, учитывающие функционирование интегрированной радиолокационной системы и позволяющие в едином информационном поле получать требуемые для обучения СРЛР информационные параметры. Показано, что снятие ограничений, связанных с автономностью функционирования РЭС, позволяет использовать апостериорную информацию при реализации систем радиолокационного распознавания. Этот факт дает возможность увеличить количество используемых в алгоритмах признаков распознавания и пополнить базы портретов.

Заключение. СРЛР может развиваться посредством обучения за счёт снятия ограничений, связанных с автономностью функционирования РЭС. Это позволяет повысить адекватность оценки обстановки и оптимизировать принимаемые управленческие решения.

Ключевые слова: радиолокационное распознавание, апостериорная информация, нейросеть, обучение, радиолокационное средство, информационное пространство

Для цитирования: Использование апостериорной информации при реализации систем радиолокационного распознавания с применением нейросетевых технологий / Д. Ф. Бескостый, С. Г. Боровиков, Ю. В. Ястребов, И. А. Созонтов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 5. С. 52–60. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-52-60

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.07.2019; принята к публикации после рецензирования 16.09.2019; опубликована онлайн 29.11.2019



Use of Aposteriori Information in the Implementation of Radar Recognition Systems Using Neural Network Technologies

Dmitrii F. Beskostyi¹, Sergei G. Borovikov¹, Yurii V. Yastrebov¹, Ilya A. Sozontov^{2✉}

¹Central Research Institute of the Air Force
of the Russian Ministry of Defense, St. Petersburg, Russia

² Military Aerospace Defense Academy, Tver-22, Russia

✉ ilya.sozontov@gmail.com

Abstract

Introduction. The current need to obtain relevant, complete and reliable information about airborne objects has led to the continuous improvement of modern radar recognition systems (MRRS) as part of control systems. The development of modern MRRS has created objective prerequisites for the use of progressive and new methods and algorithms for the processing of signals using neural networks. The use of artificial neural networks with learning ability permits expansion to include many signs of recognition by using information obtained in the process of monitoring airspace.

Aim. To formulate the problem and develop proposals for the use of posterior information for airspace control in radar recognition systems using neural network technologies.

Materials and methods. Based on an analysis of the structure of a unified information network, an approach was formulated to facilitate the development of MRRS based on training technologies. Using the synthesis method, examples of technical solutions were proposed, which will allow the use of modern methods and signal processing algorithms using a posteriori information generated by the control system.

Results. The study identified the principles of neural network training in solving the recognition problem in the process of functioning of radio electronic equipment (REE). The technical solutions proposed take the functioning of the integrated radar system into account, allowing the information parameters required for training MRRS in a single information field to be obtained. It is shown that the removal of restrictions associated with the functional autonomy of REE, allows the use of posterior information in the implementation of radar recognition systems. This also allows for an increase in the number of recognition signs used in the algorithms and for the database of portraits to be replenished.

Conclusion. MRRS can be developed via training by removing the restrictions associated with the autonomous functioning of RES. This allows for the situational assessment to be enhanced and management decisions to be optimised.

Key words: radar recognition, aposteriori information, neural network, training, radar, information space

For citation: Beskostyi D. F., Borovikov S. G., Yastrebov Yu. V., Sozontov I. A. Use of Aposteriori Information in the Implementation of Radar Recognition Systems Using Neural Network Technologies. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 5, pp. 52–60. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-52-60

Conflict of interest. Author declare no conflict of interest.

Submitted 01.07.2019; accepted 16.09.2019; published online 29.11.2019

Введение. Значимость систем управления (СУ) в современном обществе постоянно растет. Они применяются как в гражданских, так и в военных сферах деятельности. Для выработки решений (управляющих воздействий) в СУ необходимы достоверные и максимально полные исходные данные.

Одним из основных направлений создания и совершенствования воздушно-космической обо-

роны (ВКО) в соответствии с концепцией ВКО Российской Федерации [1] являются полномасштабное развертывание федеральной системы разведки и контроля воздушного пространства (ФСР и КВП) и формирование единого информационного пространства (ЕИП) о состоянии воздушной обстановки. Элементами технической составляющей ФСР и КВП являются радиолокационные средства

Использование апостериорной информации при реализации систем радиолокационного распознавания с применением нейросетевых технологий
Use of Aposteriori Information in the Implementation of Radar Recognition Systems Using Neural Network Technologies

(РЛС) (в общем случае радиоэлектронные средства (РЭС)), формирующие первичные исходные данные для принятия решений.

В настоящее время вызывает повышенный интерес распознавание воздушных объектов, поскольку оно обеспечивает большую полноту радиолокационной информации о реально складывающейся обстановке и, как следствие, оптимизацию и повышение адекватности формируемых на пунктах управления различной степени иерархии решений.

В связи с этим в состав информации, выдаваемой РЛС потребителям, стремятся включить данные о принадлежности радиолокационной цели к тому или иному классу (типу). Подобную информационную составляющую формирует входящая в состав РЛС система радиолокационного распознавания на основе информационных параметров сигналов, принимаемых при обзоре воздушного пространства.

Процесс распознавания основан на отождествлении с эталонами содержащихся в принимаемых сигналах определенных признаков (в общем случае наличие признака – достаточное условие для принадлежности объекта некоторому классу).

Формируемые при построении систем радиолокационного распознавания (СРЛР) из признакового пространства словари признаков представляют из себя априорную информацию для конкретного РЭС. Она создается посредством моделирования и проведения экспериментальных исследований [2–4].

Полученная в результате функционирования СУ, включающей РЭС с СРЛР, апостериорная информация, несмотря на наличие достаточно широко представленного математического аппарата [4–6], в настоящее время применяется в основном для обеспечения потребителей и оценки работоспособности алгоритмов распознавания.

В то же время ввиду необходимости актуальной, полной и достоверной информации о воздушных объектах для контроля воздушного пространства и принятия адекватных мер можно использовать апостериорную информацию, формируемую СУ, включающей РЭС с СРЛР, при применении нейросетевых технологий, в том числе для обеспечения алгоритмов распознавания исходными данными и для корректировки алгоритмов первичной и вторичной обработки сигналов.

Методы. Формально радиолокационное распознавание (РЛР) – задача отнесения обнаружен-

ного объекта к одному из элементов множества $\{A_i\}$, представляющего собой алфавит классов, – при ограничении на общие затраты, ассигнованные на создание всех устройств, решающих задачу РЛР, сводится к отысканию экстремума функционала [2]

$$\mathfrak{E}[t, S_{nt}, X_{lt}, H_{rt}, H_q, Z|B],$$

где $\mathfrak{E}[K]$ – выбранный критерий оценки эффективности; t – количество средств, привлекаемых к решению задачи распознавания; S_{nt} – множество типов радиолокационных сигналов; X_{lt} – множество описаний признаков; H_{rt} – множество правил принятия решений о классе радиолокационной цели; H_q – множество правил использования данных о классе объекта; $B = \{b_j\}$ – множество объектов различных типов; Z – множество параметров объектов, которые могут быть получены РЛС.

При решении задачи распознавания реализуются различные алгоритмы, обусловленные особенностями технической реализации применяемых методов, в свою очередь основанные на использовании определенного(ых) признака(ов).

Представляя алгоритм распознавания информационных портретов как абстрактную функциональную систему, состоящую из алфавита классов, словаря признаков, множества R правил (алгоритмов) принятия решения о принадлежности объекта к определенному классу, получим зависимость решения задачи распознавания от реализуемого алгоритма:

$$\mathfrak{E}[t, S_{nt}, R, \{Z|B\}].$$

Процесс развития СРЛР можно представить как процесс модификации алгоритма(ов) распознавания при условии постоянства множества типов радиолокационных сигналов S_{nt} :

$$\begin{aligned} \mathfrak{E}[t, S_{nt}, R_1, \{Z|B\}] Q_1 &\leq \\ &\leq \mathfrak{E}[t, S_{nt}, R_2, \{Z|B\}] Q_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где R_1 и R_2 – множество алгоритмов распознавания, реализуемых РЭС до и после обучения соответственно $[R_1 \subset R, R_2 \subset R, R_1 \neq R_2, R_2 = \Lambda(R_1)]$; Q_1 и Q_2 – множество условий, в которых функционируют реализующие алгоритмы распознавания РЭС.

При этом $Q_1 \subset Q, Q_2 \subset Q$, где Q – множество возможных условий функционирования РЭС.

Выполнение условия (1) основано на способности системы к обучению [3], т. е. к изменению своих параметров и (или) структуры в зависимости от экспериментальных данных. Конечное множество таких данных называется обучающей выборкой. Обучение является множеством правил использования данных о классе объекта H_q и описаний признаков X_{lt} .

Признаки радиолокационного распознавания разделяют по их физической природе [4].

Принципиальное отличие обучаемых классификаторов состоит в том, что границы между классами образов (портретов) определяются не непосредственным вычислением соответствующих коэффициентов в разделяющих функциях, а итеративно.

Типичными для рассматриваемой категории классификаторов являются искусственные нейронные сети (НС) [7–10], для которых свойство обучаемости естественно и неотъемлемо. Их применение дает хорошие результаты даже при использовании одного признака распознавания [11–13]. Применение в СРЛР совокупности признаков в настоящее время вызывает определенные трудности, связанные не только с усложнением аппаратуры главного тракта приема РЭС, но и с наличием априорной неопределенности при использовании отдельных признаков. Устранение априорной неопределенности [14] достигается комплексированием и обучением.

Для обучения нейроподобной системы необходима база данных (БД) обучающих примеров. Чем полнее БД и чем точнее примеры соответствуют рабочим режимам системы, тем точнее впоследствии система будет работать. Одним из направлений обучения с учетом применения структуры нейросети является корректировка весов (степени важности конкретного признака) для РЭС.

Универсального алгоритма обучения, подходящего для всех архитектур НС, не существует. Известен лишь набор средств, представленный множеством алгоритмов обучения, каждый из которых имеет свои достоинства. Алгоритмы обучения отличаются друг от друга способом настройки синаптических весов нейронов. Еще одной отличительной характеристикой является способ связи обучаемой нейросети с внешним миром. В этом контексте говорят о парадигме

обучения (learning paradigm), связанной с моделью окружающей среды, в которой функционирует данная НС. В НС поступают стимулы из внешней среды, определяемые компонентами $t, S_{nt}, X_{lt}, \{Z|B\}$. В результате этого изменяются параметры НС, после чего она отвечает на возбуждения уже иным образом.

В настоящее время применительно к НС рассматривают 5 основных моделей обучения:

- на основе коррекции ошибок;
- с использованием памяти;
- хеббовское обучение;
- конкурентное обучение;
- метод Больцмана.

Обучение, основанное на коррекции ошибок, реализует метод оптимальной фильтрации. Обучение на основе памяти предполагает явное использование обучающих данных. Метод Хебба и конкурентный подход к обучению основаны на нейробиологических принципах. В основу метода Больцмана положены идеи статистической механики.

Реализация алгоритмов обучения предполагает наличие достоверной информации о типе (классе) объектов распознавания после их обнаружения и отождествления.

В случае формирования ЕИП о состоянии воздушной обстановки путем сбора и обработки информации, добываемой различными источниками (включая собственные унифицированные для Минобороны, Росавиации и других министерств и ведомств радиолокационные комплексы), и наличия доступа к этому пространству различных потребителей с учетом разграничений их полномочий при решении стоящих перед ними задач указанная информация может быть получена непосредственно либо от средств автоматизации (в том числе от единой системы организации воздушного движения (ЕС ОВД)), а также от операторов, прошедших специальную подготовку.

Кроме того, пополнять базы данных, а в ряде случаев и формировать их целесообразно после распознавания при наличии подтверждения правильности решения. Возможна корректировка степени важности отдельных признаков на этапе ввода техники в эксплуатацию в конкретных позиционных районах.

Таким образом, при реализации аппаратуры распознавания с использованием глубокой (содержащей несколько многослойных фильтров) НС понятие эталонного портрета объекта приоб-

ретаает более широкое значение. В этом случае эталонный портрет не только должен включать множество описаний признаков X_{lt} , но и учитывать реализуемый алгоритм R , входящий во множество правил принятия решений о классе радиолокационной цели H_{lt} .

Согласно руководящим документам Министерства обороны РФ обучение стоящих на вооружении РЭС является противоречивой задачей. С одной стороны, производитель, обеспечивая заданные характеристики средств, реализует конкретные алгоритмы, с другой – эти алгоритмы в процессе эксплуатации могут быть подвергнуты коррекции. Без применения дополнительных мер корректировка в ряде случаев может снизить качественные показатели, поэтому необходимо разделить процессы выполнения боевых задач и обучения. С этой целью предусматривается включение в состав РЭС дополнительных элементов, обеспечивающих независимость процесса обучения.

Применительно к НС реализуемые ею алгоритмы распознавания могут отличаться весовыми коэффициентами связей с ассоциативными и реагирующими элементами. Весовые коэффициенты могут быть представлены матрицей M_1 , при технической реализации хранящейся в памяти. В процессе обучения может приниматься решение о необходимости коррекции отдельных элементов матрицы, однако окончательное решение об изменении этих значений необходимо принимать лишь после накопления достаточной статистики. Для этого в составе системы предусматривается дополнительная матрица весовых коэффициентов M_2 , в исходном состоянии полностью идентичная M_1 , значения элементов которой в процессе обучения изменяются. После принятия решения об адекватности измененных значений матрица M_1 изменяется. Этот процесс осуществляется устройством управления весовыми коэффициентами.

Параметры указанной процедуры должны быть определены и регламентированы.

Результаты. Структурная схема устройства распознавания при использовании глубокой НС с дополнительной матрицей весовых коэффициентов для реализации задач обучения представлена на рис. 1. Устройство согласования в составе тракта обработки радиолокационной информации

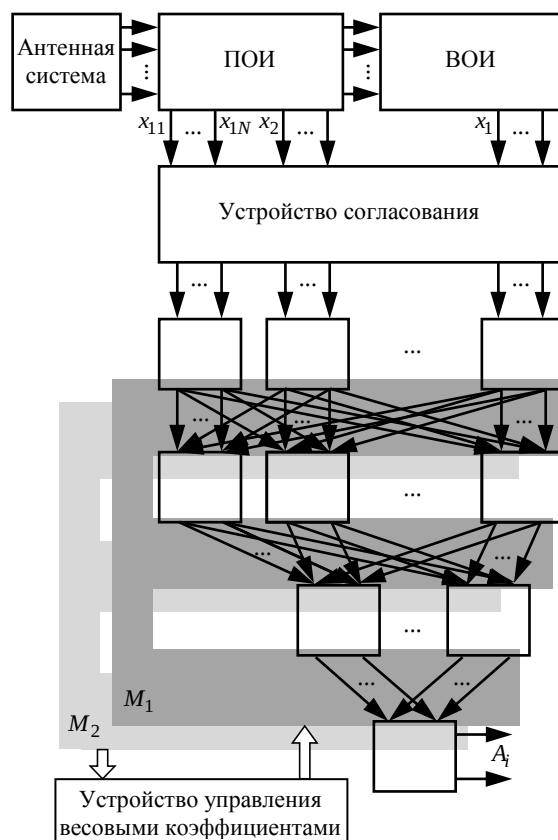


Рис. 1. Структурная схема устройства распознавания при использовании глубокой НС с дополнительной матрицей весовых коэффициентов для реализации задач обучения

Fig. 1. Block diagram of a recognition device using a deep neural network with an additional matrix of weights for the implementation of training tasks

обеспечивает нормировку в группе сигналов, содержащих один признак из общей совокупности X_{lt} , для последующей обработки с целью формирования решения A_i . Иными словами, устройство согласования совместно с аппаратурой первичной обработки информации ПОИ и вторичной обработки информации ВОИ решает задачу кластеризации [15].

В обучении при распознавании можно выделить 4 основных направления:

1. Стартовое обучение (запись портретов на этапе создания системы из базы, полученной либо экспериментально, либо в процессе имитационного моделирования с использованием информационных технологий).
2. Формирование базы портретов в процессе функционирования системы при подтверждении результатов распознавания и достаточно простой сигнальной обстановке.
3. Пополнение базы портретов в процессе функционирования системы при подтверждении

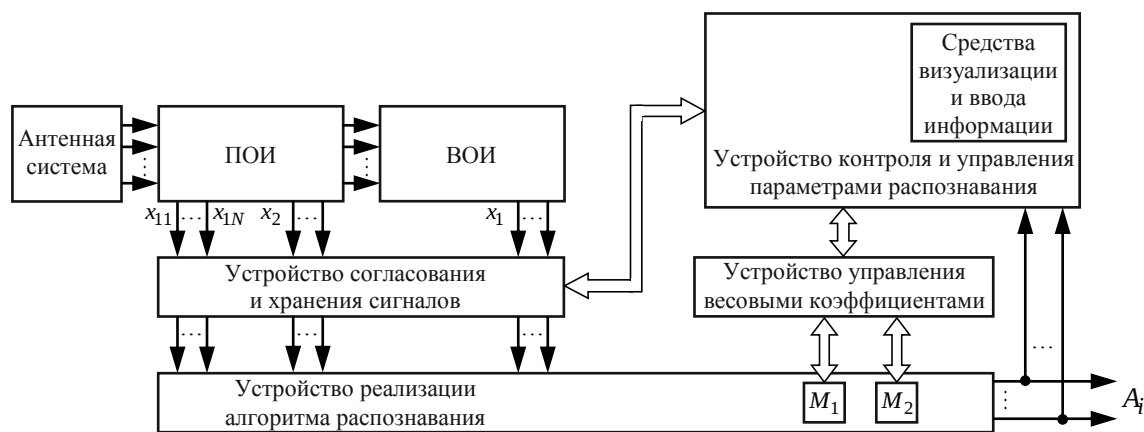


Рис. 2. СРЛР с элементами, обеспечивающими ее обучение

Fig. 2. Radar recognition system with elements providing its training

результатов распознавания и достаточно простой сигнальной обстановке.

4. Корректировка портретов для конкретной позиции с учетом особенностей позиционного района.

Для обеспечения стартового обучения предусмотрено несколько этапов [16]. На первом в качестве обучающих примеров используют цифровые, полученные моделированием фоноцелевой обстановки или оцифровкой подходящих реальных фрагментов. Данные хранятся на жестком диске компьютера. Для оценки адекватности воздействий, поступающих на вход системы, привлекаются эксперты. На этом этапе происходит отработка алгоритмов в псевдореальном времени.

Второй этап отличается от первого тем, что используются аналоговые входные сигналы – те же фрагменты, но хранящиеся на иных носителях. Оцифровка выполняется непосредственно во время работы. Данные поступают с заданной периодичностью, обработка производится в реальном времени.

Третий этап – окончательная проверка и дообучение системы – проводится на основе реальной фоноцелевой обстановки в условиях, максимально приближенных к боевым.

Портреты могут делиться на базовые (фундаментальные) и на индивидуальные для конкретной позиции. Например, для РЭС, размещенных в горной местности, результаты измерения высот целей при распознавании необходимо корректировать (учитывать высоту позиции) для адекватного сравнения с портретом, содержащим информацию о возможностях цели по набору высоты. Коррекцию целесообразно проводить на третьем этапе.

Устройство контроля и управления параметрами распознавания, включающее средства визуализации и ввода информации (рис. 2), обеспечивает реализацию стартового обучения.

Подтверждение достоверности полученных результатов возможно при взаимодействии с РЭС, комплексом средств автоматизации (КСА) Росавиации и получении информации от диспетчерских пунктов и районных центров ЕС ОВД.

При работе РЭС в составе группировки целесообразно предусмотреть возможность обмена портретными базами (без учета сформированных особенностей местности) между однотипными РЭС (рис. 3).

Широкие возможности реализации автоматических алгоритмов обучения НС, применяемых при распознавании, открываются при использовании в радиолокационной системе принципов ЕИП о состоянии воздушной обстановки, когда элементы системы связаны между собой интегрированной цифровой телекоммуникационной сетью.

Принципы ЕИП позволяют при обучении НС использовать достоверную информацию о типах сопровождаемых воздушных судов, поступающую от взаимодействующих средств Минобороны России и Росавиации (рис. 4): модулей про-

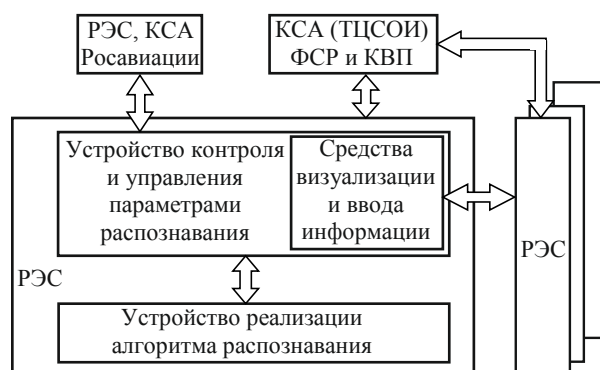


Рис. 3. Внешние связи РЭС при обучении системы распознавания в составе группировки

Fig. 3. External communications of radio-electronic equipment during the training of the recognition system as part of a grouping

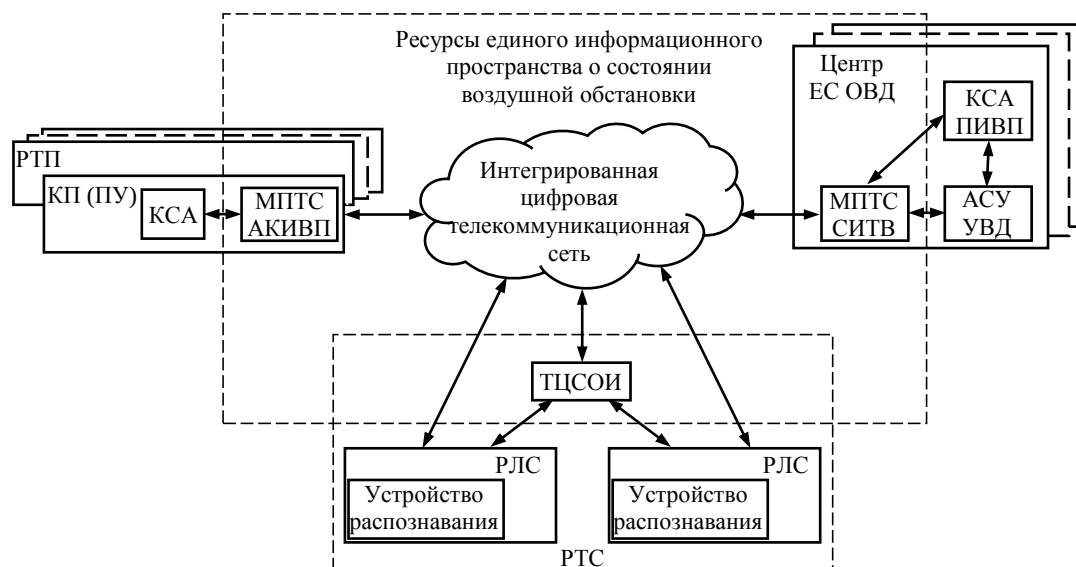


Рис. 4. Элементы, обеспечивающие обучение системы распознавания при работе в составе группировки
Fig. 4. Elements providing learning of the recognition system when working as part of a group

граммно-технических средств автоматизации контроля использования воздушного пространства МПТС АКВВП, размещаемых на командных пунктах КП радиотехнических полков РТП, и модулей программно-технических средств системы информационно-технического взаимодействия МПТС СИТВ с автоматизированными системами управления АСУ УВД, а также КСА планирования использования воздушного пространства ПИВП, размещаемых в центрах ЕС ОВД.

В такой схеме взаимодействия могут быть задействованы территориальные центры совместной обработки информации ТЦСОИ радиотехнических средств РТС радиотехнических полков, обеспечивающие централизованный сбор, обработку информации о воздушной обстановке и управление.

При этом, однако, следует учитывать, что такая организация взаимодействия (в интересах

обучения НС и построения интеллектуальных систем распознавания) потребует существенного изменения принципов взаимодействия элементов радиолокационной системы и, как следствие, пересмотра существующих протоколов информационно-технического взаимодействия.

Заключение. Таким образом, СРЛР, решающая актуальную в настоящее время задачу распознавания, которая в сложной фоновой обстановке позволяет повысить адекватность оценки обстановки и оптимизировать принимаемые управленческие решения, может развиваться посредством обучения за счет снятия ограничений, связанных с автономностью функционирования РЭС применительно к решению задачи распознавания, а также увеличения количества признаков при применении нейросетевых технологий.

Авторский вклад

Бескостый Дмитрий Федорович – описание нейронных сетей в системе распознавания и этапов их обучения, рис. 2 и описательная часть.

Боровиков Сергей Геннадьевич – аннотация, описание методов и результатов, рис. 1 и описательная часть.

Ястребов Юрий Васильевич – введение, заключение, перевод на английский язык.

Созонтов Илья Александрович – рис. 3 и описательная часть, рис. 4 и описательная часть, список литературы.

Authors' contribution

Dmitrii F. Beskosti, description of neural networks in recognition system and stages of their training, fig. 2 and descriptive part

Sergei G. Borovikov, abstract, description of methods and results, fig. 1 and descriptive part.

Yurii V. Yastrebov, introduction, conclusion, english translation

Ilya A. Sozontov, fig. 3 and descriptive part, fig. 4 and descriptive part, references.

Список литературы

1. Кобан А. Я., Самотонин Д. Н. Научно-технические проблемы развития федеральной системы разведки и контроля воздушного пространства Российской Федерации и пути их решения // Военная мысль. 2017. № 4. С. 14–19.
2. Tait P. Introduction to Radar Target Recognition / Institution of Electrical Engineers, London, 2005. IET radar series. № 18. 396 p.
3. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Л. А. Школьный, Е. Ф. Толстов, А. Н. Детков, О. А. Карпов; ВВИА им. Н. Е. Жуковского, М., 2008. 531 с.
4. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Я. Д. Ширман, С. А. Горшков, С. П. Лещенко, Г. Д. Братченко, В. М. Орленко // Радиолокация и радиометрия. 2000. № 2. С. 5–65.
5. Татузов А. Л. Нейронные сети в задачах радиолокации. М.: Радиотехника, 2009. 432 с.
6. Толстикова Е. В. Параметрическая оптимизация нелинейных нейронных сетей // Науч. записки Украинского НИИ связи. 2014. № 1. С. 16–21.
7. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.
8. Барский А. Б. Нейронные сети. Распознавание, управление, принятие решений. М.: Финансы и статистика, 2004. 176 с.
9. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / пер. с польск. И. Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
10. Тархов Д. А. Нейронные сети. Модели и алгоритмы. Кн. 18. Сер. Нейрокомпьютеры и их применение. М.: Радиотехника, 2005. 256 с.
11. Математические модели радиолокационных сигналов, отраженных от воздушных целей разных классов / В. А. Абатуров, О. В. Васильев, В. А. Ефимов, В. Е. Макаев // Радиотехника. 2006. № 7. С. 28–33.
12. Построение и обучение радиально-базисных нейросетей для приема телеграфно-кодовых конструкций / Д. А. Чистопрудов, В. А. Козлов, М. Р. Бибарсов, Д. А. Потягов, Н. Я. Карасик // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 6. С. 28–35.
13. Макаев В. Е., Васильев О. В. Метод радиолокационного распознавания воздушной цели по турбинному эффекту // Радиотехника. 2000. № 11. С. 30–33.
14. Жердев Д. А., Казанский Н. Л., Фурсов В. А. Распознавание объектов по диаграммам электромагнитного рассеяния электромагнитного излучения на основе метода опорных пространств // Компьютерная оптика. 2014. № 38. С. 503–510.
15. Митрофанов Д. Г. Применение нейросетевой технологии для распознавания целей по радиолокационным изображениям // Нейрокомпьютеры: разработка и применение, 2006. № 3. С. 60–68.
16. Костоусов В. Б., Костоусов А. В. Моделирование процесса наведения движущихся объектов по радиолокационным изображениям // Гирокоспия и навигация. 2004. Т. 2. С. 37–47.

Информация об авторах

Бескостый Дмитрий Федорович – кандидат технических наук (2009), доцент (2010), ведущий научный сотрудник 25-го научно-исследовательского отдела НИЦ ЦНИИ ВВС Министерства обороны Российской Федерации. Автор 64 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокация.
Адрес: 25 НИО НИЦ ЦНИИ ВВС Министерства обороны РФ, наб. реки Фонтанки, д. 10, Санкт-Петербург, 191028, Россия
E-mail: bescdim@rambler.ru

Боровиков Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук (2007), старший научный сотрудник 25-го научно-исследовательского отдела НИЦ ЦНИИ ВВС Министерства обороны Российской Федерации. Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – алгоритмы обработки сигналов, радиолокационные системы.
Адрес: 25 НИО НИЦ ЦНИИ ВВС Министерства обороны РФ, наб. реки Фонтанки, д. 10, Санкт-Петербург, 191028, Россия
E-mail: bors509@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0343-0527>

Ястребов Юрий Васильевич – кандидат технических наук (1987), начальник 25-го научно-исследовательского отдела НИЦ ЦНИИ ВВС Министерства обороны Российской Федерации. Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – алгоритмы обработки радиолокационной информации; распознавание, измерение координат; многопозиционные радиолокационные станции; сверхширокополосная радиолокация.
Адрес: 25 НИО НИЦ ЦНИИ ВВС Министерства обороны РФ, наб. реки Фонтанки, д. 10, Санкт-Петербург, 191028, Россия
E-mail: vanagas@bk.ru

Созонтов Илья Александрович – адъюнкт Военной академии воздушно-космической обороны им. Маршала Советского Союза Г. К. Жукова Министерства обороны Российской Федерации. Окончил Военно-воздушную инженерную академию им. проф. Н. Е. Жуковского (2008). Автор девяти научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокационные системы, распознавание воздушных объектов.
Адрес: Военная академия воздушно-космической обороны, ул. Жигарева, д. 50, г. Тверь-22, 170022, Россия
E-mail: ilya.sozontov@gmail.com

References

1. Coban A. Y., Samotokin D. N. Scientific-Technical Problems of Development of the Federal System Exploration and Control of the Airspace of the Russian Federation and Ways to Solve Them. Military Thought. 2017, no. 4, pp. 14–19. (In Russ.)
2. Tait P. Introduction to Radar Target Recognition. London: Institution of Electrical Engineers. 2005 IET radar series, no. 18, 396 p.
3. Shkolnyi L. A., Tolstov E. F., Detkov A. N., Karpov O. A. Radar System of Aerial Reconnaissance, Interpretation of Radar Images. Moscow, VVIA n. a. N. E. Zhukovsky. 2008. 531 p. (In Russ.)
4. Shirman Ya. D., Gorshkov S. A., Leshchenko C. P., Bratchenko G. D., Orlenko V. M. Methods of Radar Recognition and their Modeling. Radar and Radiometry. 2000, no. 2, pp. 5–65. (In Russ.)
5. Tatuzov A. L. Neural Networks in Radar Problems. Moscow, Radio engineering, 2009, 432 p. (In Russ.)
6. Tolstikova E. B. Parametric Optimization of Nonlinear Neural Networks. Scientific notes of the Ukrainian research Institute of communications. 2014, no. 1, pp. 16–21. (In Russ.)
7. Haikin. S. Neural networks: full course. Moscow, Williams, 2006, 1104 p. (In Russ.)
8. Barsky A. B. Neural Networks. Recognition, Management, Decision-Making. Moscow, Finance and statistics, 2004, p. 176. (In Russ.)
9. Osovsky S. Neural Networks for Information Processing. Trans. from Polish by I. D. Rudinsky. Moscow, Finance and Statistics, 2002, 344 p. (In Russ.)
10. Tarkhov D. A. *Neironnye seti. Modeli i algoritmy* [Neural Networks. Models and Algorithms]. Moscow, Radiotekhnika, 2005, 256 p. (In Russ.)
11. Abaturov V. A., Vasiliev O. V., Efimov V. A., Makaev V. E. Mathematical Models of Radar Signals Reflected from Air Targets of Different Classes. Radio engineering. 2006, no. 7, p. 28–33. (In Russ.)
12. Chistoprudov D. A., Kozlov V. A., Bibarsov M. R., Potyagov D. A., Karasik N. Ya. Construction and Training of Radial-Based Neural Networks for Receiving Telegraph and Code Structures. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2017, no. 6, pp. 28–35. (In Russ.)
13. Makaev V. E., Vasiliev O. V. Method of Radar Recognition of Air Targets by Turbine Effect. Radio engineering. 2000, no. 11, pp. 30–33. (In Russ.)
14. Zherdev D. A., Kazansky N. L., Fursov V. A. Recognition of Objects by Electromagnetic Scattering Diagrams of Electromagnetic Radiation Based on the Method of Reference Spaces. Computer Optics. 2014, no. 38, pp. 503–510. (In Russ.)
15. Mitrofanov D. G. Application of Neural Network Technology for Target Recognition by Radar Images. Neurocomputers: development and application, 2006, no. 3, pp. 60–68. (In Russ.)
16. Kostousov V. B., Kostousov A.V. Modeling of the Process of Guidance of Moving Objects by Radar Images. Gyroscopy and Navigation. 2004, vol. 2, pp. 37–47. (In Russ.)

Information about the authors

Dmitrii F. Beskostyi – Cand. Sci. (Eng.) (2009), Associate Professor (2010), Leading Researcher in 25 SRU SIC (St Petersburg) Central Research Institute of the Air Force of the Russian Ministry of Defense. The author of 64 scientific publications. Area of expertise: radiolocation.

Address: Central Research Institute of the Air Force of the Russian Ministry of Defense, 10 Fontanka River, St Petersburg 191028, Russia

E-mail: bescdim@rambler.ru

Sergei G. Borovikov – Cand. Sci. (Eng.) (2007), Senior Researcher in 25 SRU SIC (St Petersburg) Central Research Institute of the Air Force of the Russian Ministry of Defense. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: signal processing algorithms; radar systems.

Address: Central Research Institute of the Air Force of the Russian Ministry of Defense, 10 Fontanka River, St Petersburg 191028, Russia

E-mail: bors509@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0343-0527>

Yurii V. Yastrebov – Cand. Sci. (Eng.) (1987), Head of 25 SRU SIC (St Petersburg) Central Research Institute of the Air Force of the Russian Ministry of Defense. The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: algorithms for processing radar information; recognition; measurement of coordinates; multi-position radar stations; ultra-wideband radar.

Address: Central Research Institute of the Air Force of the Russian Ministry of Defense, 10 Fontanka River, St Petersburg 191028, Russia

E-mail: vanagas@bk.ru

Ilya A. Sozontov – Adjunct of Military Aerospace Defense Academy. He graduated from Zhukovsky Air Force Engineering Academy (2008). The author of 9 scientific publications. Area of expertise: radar systems, recognition of airborne objects.

Address: Military Aerospace Defense Academy, 50 Zhigareva Str., Tver-22 170022, Russia

E-mail: ilya.sozontov@gmail.com

Обнаружение траекторий движущихся прямолинейно воздушных целей при вторичной обработке радиолокационной информации

Г. С. Нахмансон, Д. С. Акиншин✉

Военно-воздушная академия
им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, Россия

✉ ads199011@icloud.com

Аннотация

Введение. Основными задачами вторичной обработки радиолокационной информации являются обнаружение и сопровождение траекторий движения воздушных целей (ВЦ). При этом процесс обнаружения траекторий движения ВЦ принято характеризовать вероятностями их обнаружения и средним временем их автозахвата. При движении цели ее дальность от радиолокационной станции (РЛС) изменяется, что приводит к изменению отношения сигнал/шум и вероятности обнаружения ВЦ.

Цель работы. Оценка влияния изменения вероятности обнаружения прямолинейно движущейся цели при радиолокационных наблюдениях на характеристики обнаружения траектории ее движения при вторичной обработке радиолокационной информации.

Методы. Используются методы математической статистики: проверка статистических гипотез, оценка параметров распределений и теория возмущений по малому параметру. В качестве возмущающего параметра выбрано отношение расстояния, проходимого ВЦ за период обзора, к дальности цели в начальный момент ее обнаружения.

Результаты. Получены аналитические выражения для вероятности обнаружения прямолинейно движущейся ВЦ и вероятности обнаружения траектории ее движения на интервалах, кратных периоду обзора. Проиллюстрировано уменьшение вероятности обнаружения ВЦ, удаляющейся от РЛС, при последовательных радиолокационных наблюдениях с уменьшением отношений сигнал/шум и угла между вектором скорости и радиусом-вектором ВЦ относительно РЛС. Увеличение скорости ВЦ, вызывающее изменение параметра z с 0.01 до 0.07, приводит к уменьшению вероятности обнаружения ВЦ с 0.727 до 0.52 и к соответствующему изменению вероятности обнаружения траектории. При сокращении времени наблюдения на один временной интервал уменьшение вероятности обнаружения траектории составляет от 0.03 до 0.04...0.07 для отношения сигнал/шум 40 и от 0.06 до 0.08...0.11 для отношения сигнал/шум 25 (при вероятности ложной тревоги 10^{-4}).

Заключение. Полученные выражения позволяют рассчитывать характеристики обнаружения траекторий воздушных целей, движущихся прямолинейно, с учетом изменений вероятностей обнаружения целей в последовательных временных интервалах обзора радиолокационных наблюдений.

Ключевые слова: автозахват траектории, среднее время обнаружения, дисперсия, характеристики обнаружения

Для цитирования: Нахмансон Г. С., Акиншин Д. С. Обнаружение траекторий движущихся прямолинейно воздушных целей при вторичной обработке радиолокационной информации // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 5. С. 61–70. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-61-70

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 05.07.2019; статья принята к публикации после рецензирования 15.09.2019; опубликована онлайн 29.11.2019



Detection of the Trajectories of Moving Rectilinearly Air Targets in the Secondary Processing of Radar Information

G. S. Nakhmanson, D. S. Akinshin✉

N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia

✉ ads199011@icloud.com

Abstract

Introduction. The primary functions of secondary processing of radar information are to detect and maintain the trajectories of air targets (AT). The AT trajectory detection can be characterised by the probability of detecting trajectory and average autocapture time. When the target moves, its distance from the radar station changes, leading to a change in the signal/noise ratio and the probability of detecting AT.

Aim. To assess the impact of a change in the probability of detection of a straight and evenly moving target at consecutive time intervals of radar observation upon the characteristics of trajectory detection during secondary processing of radar information.

Methods and materials. The research aim was achieved using the methods of mathematical statistics, including verification of statistical hypotheses, assessment of distribution parameters and theory of perturbations by small parameters. The ratio of the distance travelled by the AT during the review period to the target range at the initial moment of its detection was chosen as a perturbation parameter.

Results. Analytical expressions were established for the probability of detecting a straight-moving AT and the probability of detecting the trajectory of its movement at interval multiples during the study period. The study illustrated the probability of detecting AT moving away from radar by means of consistent radar observations with reduced signal/noise ratios and angles between the velocity vector and the AT vector radius relative to the radar. The increase in AT speed which causes the z parameter to change from 0.01 to 0.07 reduces the probability of AT detection from 0.727 to 0.52 and leads to a corresponding change in the probability of detecting the trajectory. If the observation time is reduced by one time interval, the probability of detecting the trajectory is from 0.03 to 0.04...0.07 for signal/noise 40 ratio and from 0.06 to 0.08...0.11 for signal/noise 25 ratio (with the probability of false alarm 10^{-4}).

Conclusion. The resulting expressions allow for the calculation of directly moving AT trajectory detection, considering changes in the probability of detecting targets in successive time intervals of radar observations.

Key words: auto-trajectory, the average time of detection, dispersion, detection characteristics

For citation: Nakhmanson G. S., Akinshin D. S. Detection of the Trajectories of Moving Rectilinearly Air Targets in the Secondary Processing of Radar Information. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 5, pp. 61–70. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-61-70

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 05.07.2019; accepted 15.09.2019; published online 29.11.2019

Введение. Одной из основных задач, решаемых радиолокационной станцией (РЛС), является сопровождение движущихся воздушных целей (ВЦ). Эта задача решается в результате первичной и вторичной обработки радиолокационной информации (РЛИ). Под первичной обработкой понимается обнаружение цели в определенный момент времени. Вторичная обработка состоит в обнаружении траектории (последовательном об-

наружении ВЦ за несколько установленных заранее интервалов обзора) и в ее сопровождении.

Эффективность решения задач вторичной обработки принято оценивать по вероятности обнаружения траектории движения ВЦ и среднему времени ее обнаружения [1–9]. Указанные характеристики существенным образом зависят от вероятностей обнаружения ВЦ в каждой из точек наблюдения, которые обычно при вторичной обработке РЛИ при-

нято считать одинаковыми [3, 4, 9–12]. Однако при движении дальность ВЦ относительно РЛС может существенно меняться, что вызывает изменение отношений сигнал/шум для отраженных от цели принимаемых сигналов и, соответственно, вероятности обнаружения ВЦ. Дополнительную информацию об обнаружении траектории ВЦ, помимо среднего времени захвата, дает изменение вероятности ее обнаружения на заранее заданных интервалах времени [13, 14]. Поэтому исследование влияния изменения вероятности обнаружения ВЦ в точках ее последовательного радиолокационного наблюдения на характеристики обнаружения траекторий движения ВЦ при вторичной обработке РЛИ представляет практический интерес.

Целью настоящей статьи является оценка влияния изменения вероятности обнаружения прямолинейно движущейся цели при радиолокационных наблюдениях на характеристики обнаружения траектории ее движения при вторичной обработке РЛИ.

Методы обнаружения целей. Будем считать, что ВЦ движется со скоростью v по прямолинейной траектории, составляющей с радиусом-вектором R_0 нахождения ВЦ в начальный момент ее обнаружения угол θ (рис. 1). Дальности цели через интервалы времени T_0 , равные периоду обзора РЛС, определяются как $R_1, R_2, \dots, R_k$.

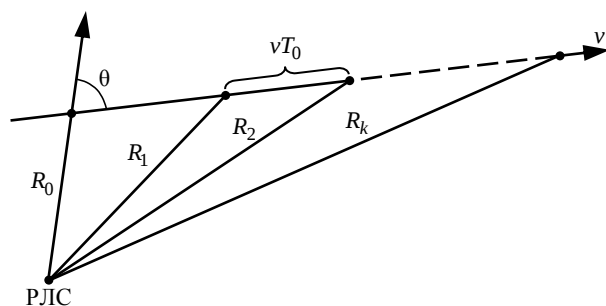


Рис. 1. К расчету дальности цели в точках наблюдения

Fig. 1. To the calculate of the ranges of the targets in the observation points

В этом случае расстояния между точками местоположения ВЦ на траектории движения в моменты наблюдения составляют vT_0 . В этом случае дальность ВЦ через k интервалов обзора составляет:

$$R_k = \sqrt{R_0^2 + (kvT_0)^2 + 2kvT_0R_0 \cos \theta} = R_0 \sqrt{1 + \left(\frac{kvT_0}{R_0}\right)^2 + 2\frac{kvT_0}{R_0} \cos \theta}. \quad (1)$$

Мощность сигнала, отраженного от цели и принимаемого РЛС, имеет вид [1, 2]

$$P_c = a^2 = \frac{P_n G \sigma_{\text{ц}} A_{\text{пр}}}{(4\pi)^2 R^4},$$

где a – эффективное значение амплитуды; P_n – мощность передатчика; G – коэффициент усиления антенны; $\sigma_{\text{ц}}$ – эффективная поверхность отражения; $A_{\text{пр}}$ – эффективная поверхность антенны; R – дальность до цели от РЛС.

Мощность сигнала, принимаемая при начальном наблюдении:

$$P_{c0} = a_0^2 = \frac{P_n G \sigma_{\text{ц}} A_{\text{пр}}}{(4\pi)^2 R_0^4}.$$

Соотношение мощностей принятого сигнала на начальном и текущем наблюдениях имеет вид

$$P_c / P_{c0} = a^2 / a_0^2 = (R_0 / R)^4,$$

откуда $a^2 = a_0^2 (R_0 / R)^4$.

Тогда отношение сигнал/шум для сигнала, отраженного от ВЦ, находящейся на k -м временном интервале обзора, и принимаемого приемником РЛС:

$$Q_k = \frac{2a^2 E_1}{N_0} = \frac{2a_0^2 E_1}{N_0} \left(\frac{R_0}{R_k}\right)^4 = Q_0 \left(\frac{R_0}{R_k}\right)^4, \quad (2)$$

где

$$E_1 = \frac{1}{2} \int_0^T U^2(t) dt$$

– энергия сигнала при единичной амплитуде; N_0 – двухсторонняя спектральная плотность шума; Q_0 – отношение сигнал/шум на выходе приемника РЛС при приеме сигнала, отраженного от ВЦ, в момент радиолокационного наблюдения на дальности R_0 от РЛС.

Если принимаемый сигнал имеет случайные начальную фазу и амплитуду, причем начальная фаза распределена равномерно на интервале $(-\pi; \pi)$, а амплитуда подчиняется релеевскому распределению:

$$\omega(a) = (a/\sigma_a^2) e^{-[a^2/(2\sigma_a^2)]}, \quad a \geq 0,$$

где σ_a^2 – дисперсия флуктуаций амплитуды сигнала, отраженного от цели, то отношение сигнал/шум принимает вид $Q_0 = 2\sigma_a^2 E_1 / N_0$.

С учетом указанных распределений параметров принимаемого сигнала подставим (1) в (2) и разложим полученное выражение в ряд по малой величине $z = vT_0/R_0$ – отношению расстояния, проходимого ВЦ за время одного периода обзора T_0 , к дальности цели в начальный момент ее обнаружения. Тогда отношение сигнал/шум для сигнала, отраженного от ВЦ, находящейся в точке k траектории, и принимаемого приемником РЛС, имеет вид

$$Q_k = Q_0 (R_0/R_k)^4 = Q_0 \left[1 - 4k(vT_0/R_0) \cos \theta + 2(6 \cos^2 \theta - 1)k^2(vT_0/R_0)^2 \right]^2. \quad (3)$$

Вероятности правильного обнаружения ВЦ при последовательных временных интервалах радиолокационных наблюдений определяются соотношением [9], [10]

$$D_k = F^{(1+Q_k)^{-1}}, \quad (4)$$

где F – вероятность ложной тревоги.

Подставив (3) в (4) и разложив последнее выражение в ряд по z , получим выражение для вероятности правильного обнаружения ВЦ в точке k траектории:

$$D_k = D_0 + A_1 k z + A_2 (k z)^2, \quad (5)$$

где

$$A_1 = D_0 \frac{4Q_0 \ln F \cos \theta}{(1+Q_0)^2};$$

$$A_2 = D_0 \left[\frac{8(\ln F Q_0 \cos \theta)^2}{(1+Q_0)^4} + \right.$$

$$\left. + \frac{\ln F (4Q_0 \cos \theta)^2}{(1+Q_0)^3} + \frac{2Q_0 \ln F (1-6 \cos^2 \theta)}{(1+Q_0)^2} \right].$$

На рис. 2 приведены результаты расчетов вероятности правильного обнаружения (D_k) ВЦ, движущейся по прямолинейной траектории, как функции от номера интервала наблюдения, кратного периоду обзора РЛС (T_0), для отношения сигнал/шум на выходе приемника РЛС, при приеме сигнала, отраженного от цели, находящейся в момент радиолокационного наблюдения на дальности R_0 от РЛС $Q_0 = 30$, отношении расстояния, проходимого ВЦ за время одного обзора РЛС, к ее дальности в начальный момент наблюдения $z = 0.01$ и 0.07 , вероятности ложной тревоги F при различных значениях угла θ между траекторией движения ВЦ и ее радиусом-вектором в начальной точке наблюдения.

Из хода кривых на рис. 2 и соотношения (1) следует, что вероятности правильного обнаружения уменьшаются с увеличением номера интервала наблюдения ВЦ относительно начального момента ее обнаружения, а также при уменьшении угла θ между направлением движения ВЦ и радиусом-вектором ее местонахождения в начальный момент наблюдения ($k = 0$). Действительно, уменьшение угла приводит к увеличению дальности ВЦ относительно РЛС за интервал обзора.

Сравнение кривых на рис. 2, *а* и *в* показывает, что на уменьшение вероятности обнаружения влияет также увеличение скорости движения ВЦ, вызывающее увеличение расстояния, проходимого ею за временной интервал обзора T_0 , и, соответственно, ее дальности от РЛС, и уменьшение отношения сигнал/шум для принимаемого сигнала, отраженного от ВЦ. Так, для $\theta = 25^\circ$ при $F = 10^{-4}$ и $Q_0 = 30$ увеличение скорости ВЦ, вызывающее изменение параметра z с 0.01 до 0.07 ,

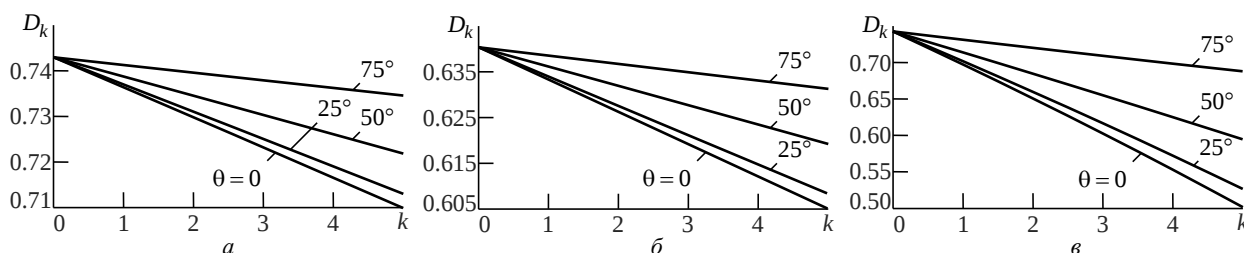


Рис. 2. Зависимости вероятности правильного обнаружения от номера интервала обзора РЛС

Fig. 2. Dependencies of the probability of correct detection on the number of radar coverage interval:

a – $z = 0.01$; $F = 10^{-4}$; *б* – $z = 0.01$; $F = 10^{-6}$; *в* – $z = 0.07$; $F = 10^{-4}$

приводит к уменьшению D_3 с 0.727 до 0.52. К уменьшению D_k приводит также снижение вероятности ложной тревоги, вызываемое увеличением уровня порога решающего устройства приемника обнаружения сигнала. Как следует из кривых для $\theta = 25^\circ$ на рис. 2, а и б, изменение F от 10^{-4} до 10^{-6} при прочих равных условиях вызывает уменьшение вероятности D_3 с 0.725 до 0.621.

Характеристики обнаружения траектории движения цели. Обнаружение траектории осуществляется в два этапа. На первом этапе при последовательном обнаружении цели на первых двух периодах радиолокационного обзора (интервалах наблюдения), сопровождаемых формированием меток в системе вторичной обработки РЛИ, происходит завязка траектории (определение предполагаемой траектории цели по двум точкам) с вероятностью $P = P_0 P_1$, где $P_0 = D_0$, $P_1 = D_1$ – вероятности обнаружения цели в начальный момент ее наблюдения и следующий за ним период обзора. Обнаружение траектории движения цели осуществляется после ее завязки при обнаружении цели (формировании метки) на одном из нескольких последующих интервалов радиолокационного наблюдения [10].

Учитывая, что вероятности правильного обнаружения ВЦ в различные периоды ее наблюдения не одинаковы, вероятность обнаружения траектории (появления метки в любом из k последующих интервалов обзора) определяется как

$$P_{\text{от}} = P_0 P_1 \sum_{k=2}^n P_k,$$

где

$$P_k = \begin{cases} D_2, & k = 2; \\ D_k \prod_{i=2}^{k-1} (1 - D_i), & k > 2 \end{cases} \quad (6)$$

– вероятность обнаружения ВЦ на k -м интервале ее наблюдения при автозахвате траектории. Тогда среднее время обнаружения траектории движения ВЦ (появление третьей метки):

$$T_{\text{ср}} = \frac{P_0 P_1 \sum_{k=2}^n T_0 (k+1) P_k}{P_0 P_1 \sum_{k=2}^n P_k} =$$

$$= \frac{\sum_{k=2}^n T_0 (k+1) P_k}{\sum_{k=2}^n P_k} = T_0 \left(1 + \frac{h_1}{h_0} \right),$$

где n – количество временных интервалов обзора РЛС, необходимых для обнаружения траекторий движения ВЦ при вторичной обработке РЛИ;

$$h_1 = \sum_{k=2}^n k P_k; \quad h_0 = \sum_{k=2}^n P_k.$$

Аналогично найдем второй момент оценки времени обнаружения траектории ВЦ:

$$T_2 = \frac{T_0^2 \sum_{k=2}^n (k+1)^2 P_k}{\sum_{k=2}^n P_k} = \frac{h_2 + 2h_1 + h_0}{h_0},$$

где $h_2 = \sum_{k=2}^n k^2 P_k$.

Тогда выражение для дисперсии оценки времени обнаружения траектории цели имеет вид

$$\sigma^2 = T_2 - T_{\text{ср}}^2 = T_0^2 \left(\frac{h_2}{h_0} - \frac{h_1^2}{h_0^2} \right).$$

На практике принято на этапе обнаружения траектории ВЦ использовать результаты обнаружения ВЦ после завязки траектории в четырех последовательных временных интервалах обзора P_2, P_3, P_4, P_5 ($n=5$) [10, 12].

Подставив (5) в (6), после математических преобразований получим:

$$h_0 = \sum_{k=2}^5 P_k = h_{00} + h_{01}z + h_{02}z^2;$$

$$h_1 = \sum_{k=2}^5 k P_k = h_{10} + h_{11}z + h_{12}z^2;$$

$$h_2 = \sum_{k=2}^5 k^2 P_k = h_{20} + h_{21}z + h_{22}z^2,$$

где

$$h_{00} = 1 + q + q^2 + q^3; \quad h_{01} = A_1 q (5q^2 - 5q - 2);$$

$$h_{02} = A_2 q (25q^2 - 13q - 4) + A_1^2 (6 - 45q);$$

$$\begin{aligned}h_{10} &= 2 + 3q + 4q^2 + 5q^3; \\h_{11} &= A_1(25q^3 - 29q^2 - 11q - 2); \\h_{12} &= A_2q(125q^3 - 81q^2 - 25q - 4) + \\&\quad + A_1^2(6 + 50q - 225q^2); \\h_{20} &= 4 + 9q + 16q^2 + 25q^3; \\h_{21} &= A_1(125q^3 - 161q^2 - 53q - 10); \\h_{22} &= A_2q(625q^3 - 469q^2 - 127q - 20) + \\&\quad + A_1^2(42 + 330q - 1125q^2),\end{aligned}$$

причем $q = 1 - D_0$.

Тогда

$$\begin{aligned}T_{cp} &= \frac{T_0}{h_0} [h_{00} + h_{10} + (h_{01} + h_{11})z + (h_{02} + h_{12})z^2]; \\ \sigma^2 &= \frac{T_0^2}{h_0^2} [h_{00}h_{20} - h_{10}^2 + \\&\quad + (h_{00}h_{21} + h_{01}h_{20} - 2h_{10}h_{11})z + \\&\quad + (h_{00}h_{22} + h_{01}h_{21} + h_{02}h_{20} - 2h_{10}h_{12} - h_{11}^2)z^2].\end{aligned}$$

Обсуждение результатов. На рис. 3 представлены зависимости среднего времени обнаружения траектории цели, нормированного на T_0 , от отношения z при вероятности ложной тревоги $(F) 10^{-4}$ и 10^{-6} .

Из кривых на рис. 3 видно, что среднее время обнаружения траектории ВЦ (T_{cp}) увеличивается при увеличении параметра z (при увеличении скорости ВЦ и, соответственно, ее удалении от РЛС за один временной интервал наблюдения). При этом наиболее существенным фактором, влияющим на T_{cp} , является отношение сиг-

нал/шум для принимаемого сигнала в начальный момент наблюдения Q_0 . Так, уменьшение Q_0 с 40 до 25 при вероятности ложной тревоги $F = 10^{-4}$ и увеличении параметра z от 0 до 0.07 приводит к увеличению среднего времени обнаружения траектории ВЦ от 0.15 до 0.17...0.22, а при $F = 10^{-6}$ – от 0.21 до 0.19...0.29. С уменьшением вероятности ложной тревоги до $F = 10^{-6}$ (рис. 3, б) эта величина возрастает при $Q_0 = 40$ от 0.13 до 0.15...0.2, а при $Q_0 = 25$ – от 0.19 до 0.17...0.27. Причем возрастание T_{cp} при увеличении z растет с уменьшением угла θ между направлением движения ВЦ и ее радиусом-вектором в момент начального наблюдения. Последнее объясняется увеличением дальности ВЦ за временной интервал обзора, что приводит к уменьшению мощности отраженного от ВЦ сигнала, отношения сигнал/шум и уменьшению вероятности обнаружения ВЦ.

На рис. 4 представлены зависимости средне-квадратического отклонения (СКО) σ относительно среднего времени обнаружения σ траектории цели, нормированного на T_0 , от отношения z при значениях вероятности ложной тревоги 10^{-4} и 10^{-6} .

Из рисунка следует, что СКО возрастает при увеличении параметра z . Оно также зависит от отношения сигнал/шум для принимаемого сигнала в начальный момент наблюдения Q_0 и вероятности ложной тревоги. Уменьшение Q_0 с 40 до 25 при вероятности ложной тревоги $F = 10^{-4}$ при увеличении параметра z (т. е. при возрастании скорости ВЦ) от 0 до 0.07 приводит к увеличению СКО от 0.14 до 0.15...0.18, а при $F = 10^{-6}$ – от

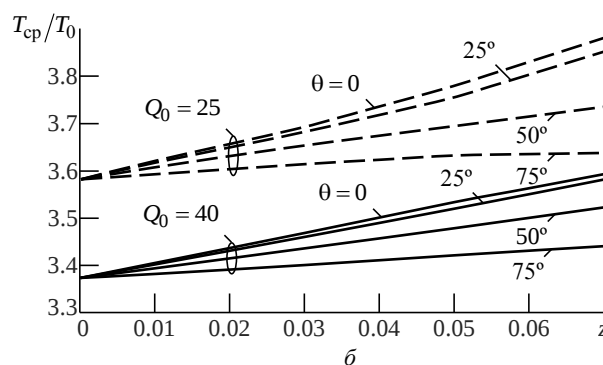
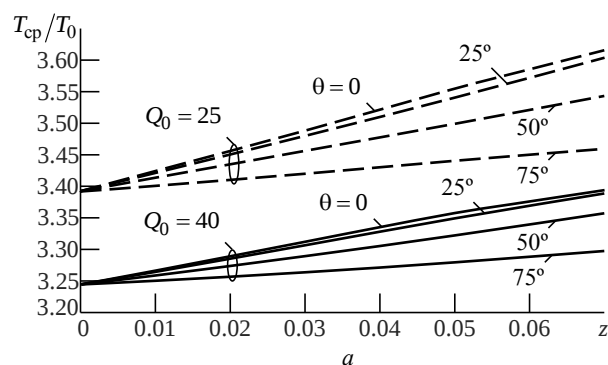


Рис. 3. Среднее время обнаружения траектории воздушной цели

Fig. 3. Average time of detection of the trajectory of an air target:

a – $F = 10^{-4}$; б – $F = 10^{-6}$

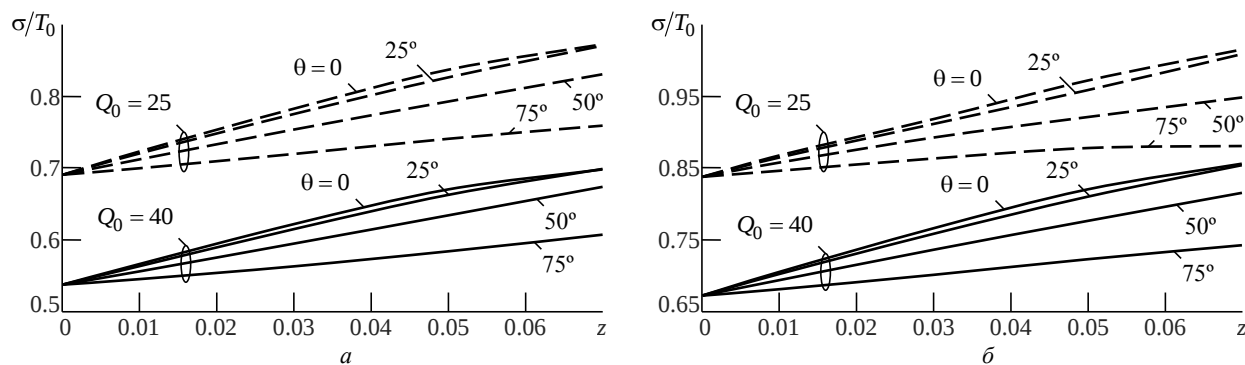


Рис. 4. Среднеквадратическое отклонение времени обнаружения траектории относительно ее среднего значения

Fig. 4. Root mean square deviation of trajectory detection time relative to its average value:

$a - F = 10^{-4}$; $b - F = 10^{-6}$

0.14 до 0.15...0.16. Причем изменение СКО σ с ростом z увеличивается с уменьшением угла θ между направлением движения ВЦ и ее радиусом-вектором в момент начального наблюдения, поскольку уменьшение угла приводит к увеличению приращения дальности ВЦ за временной интервал обзора и, соответственно, к уменьшению мощности отраженного от ВЦ сигнала, отношения сигнал/шум и уменьшению вероятности обнаружения ВЦ.

Моменты оценки времени обнаружения траектории движения ВЦ (среднее время обнаружения ($T_{\text{ср}}$) и СКО (σ)) являются интегральными характеристиками, при нахождении которых используется усреднение с учетом вероятностей обнаружения ВЦ на отводимых для обнаружения траектории движения временных интервалах обзора. Наряду с упомянутыми моментами дополнительную информацию дают изменения вероятности обнаружения траектории движения ВЦ на конкретных временных интервалах радиолокационного наблюдения (формирования третьей метки) по отношению к вероятности ее обнаружения на всех отводимых для этого временных интервалах. Эти изменения характеризуются параметрами

$$P_{23} = \frac{P_2 + P_3}{\sum_{k=2}^5 P_k}; \quad P_{24} = \frac{P_2 + P_3 + P_4}{\sum_{k=2}^5 P_k},$$

отражающими изменения вероятности при последовательных обнаружениях траектории ВЦ на втором и третьем и на втором и четвертом временных интервалах обзора соответственно.

На рис. 5 представлены зависимости изменения отношений P_{23} , P_{24} от отношения $z = vT_0/R_0$ при значениях вероятности ложной тревоги 10^{-4} и 10^{-6} .

Как следует из хода кривых, зависимости изменения вероятностей обнаружения траектории движения целей, удаляющихся по прямолинейной траектории ВЦ от РЛС, уменьшаются при увеличении параметра z (увеличении скорости ВЦ и, соответственно, ее удаления от местоположения РЛС за один интервал наблюдения, приводящих к уменьшению вероятности обнаружения ВЦ). При этом существенное влияние на значение вероятности обнаружения траектории ВЦ оказывает временной интервал ее наблюдения. Действительно, увеличение P_{24} по сравнению с P_{23} при вероятности ложной тревоги $F = 10^{-4}$, отношении сигнал/шум при начальном радиолокационном наблюдении $Q_0 = 40$ и увеличении параметра z от 0 до 0.07 составляет от 0.03 до 0.04...0.07, а при $Q_0 = 25$ – 0.06 до 0.08...0.11. С уменьшением вероятности ложной тревоги до $F = 10^{-6}$ это изменение при $Q_0 = 40$ составляет от 0.06 до 0.07...0.11, а при $Q_0 = 25$ – от 0.1 до 0.11...0.17. Причем возрастание изменения вероятности обнаружения траектории движения ВЦ на отводимых временных интервалах обзора при увеличении z растет с уменьшением угла между направлением движения ВЦ и ее радиусом-вектором в момент начального наблюдения, что связано с увеличением дальности ВЦ за временной интервал обзора и, соответственно, с уменьшением мощности отраженного от ВЦ сигнала, отношения сигнал/шум и уменьшением вероятности обнаружения ВЦ.

Отметим, что при малых интервалах наблюдения на вероятность обнаружения траектории движения ВЦ на отводимых временных интервалах обзора существенно влияет отношение сигнал/шум в начальный момент наблюдения, зависящее от даль-

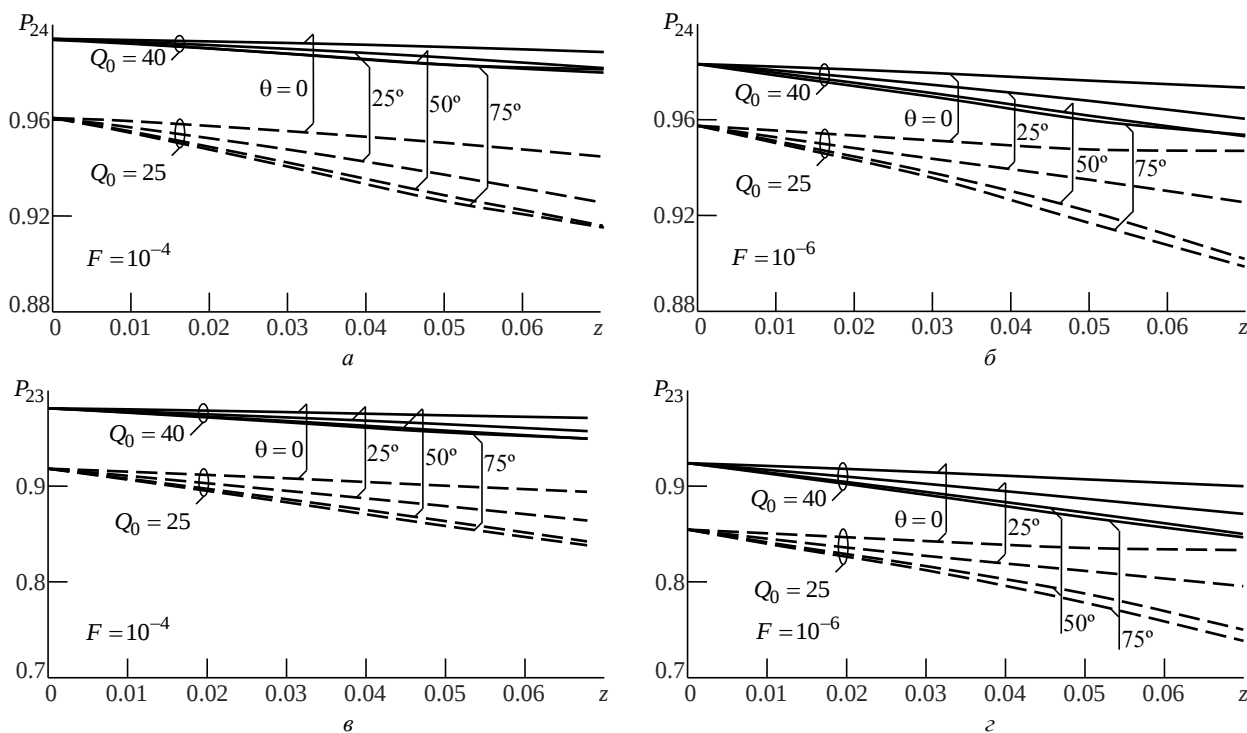


Рис. 5. Изменение вероятности обнаружения траектории воздушной цели на двух временных интервалах при формировании третьей метки

Fig. 5. The change in the probability of detecting the trajectory of an air target at two time intervals during the formation of the third mark:

$a - P_{24}, F = 10^{-4}$; $b - P_{24}, F = 10^{-6}$; $в - P_{23}, F = 10^{-4}$; $г - P_{23}, F = 10^{-6}$

ности цели и вероятности ложной тревоги. Как следует из рис. 5, изменение вероятности P_{23} , соответствующее второму и третьему интервалам наблюдения, при $F = 10^{-4}$ и изменении Q_0 от 25 до 40 увеличивается в среднем на 0.04, а P_{24} изменяется не более чем на 0.01...0.03.

Заключение. Получены аналитические соотношения для вероятностей обнаружения движущейся прямолинейно ВЦ при ее последовательных наблюдениях и вероятности обнаружения траектории движения ВЦ на отводимых временных

интервалах обзора при вторичной обработке РЛИ. Выявлено уменьшение указанных вероятностей при изменении отношения расстояния, проходимого целью за интервал обзора, к дальности цели в начальный момент ее наблюдения, отношения сигнал/шум в начальный момент наблюдения и временного интервала наблюдения. Показана целесообразность учета изменения вероятностей обнаружения прямолинейно движущихся целей при их последовательных радиолокационных наблюдениях и обнаружении их траекторий движений.

Список литературы

1. Радиолокационные системы: основы построения и теория / под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 806 с.
2. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / под ред. В. Н. Борисова. М.: Радио и связь, 2003. 640 с.
3. Киселев В. Ю., Монаков А. А. Оценка качества алгоритмов траекторной обработки в радиолокационных системах управления воздушным движением: обнаружение треков // Радиотехника. 2016. № 3. С. 28–36.
4. Wieneke M., Koch W. The PMHT: Solution for some of its problems // Proc. of SPIE. 2007. Vol. 6699. P. 1–12. doi: 10.1117/12.734388
5. Bar-Shalom Y., Blair W. D. Multitarget-Multisensor Tracking. Applications and Advances. Vol. 3. London: Artech House, 2000. 608 p.
6. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Pt. II: Ballistic Target Models // Proc. of SPIE Conf. on Signal and Data Processing of Small Targets. San Diego (USA), July-Aug. 2001. 23 p.
7. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Pt. III: Measurement Models // Proc. of SPIE

Conf. on Signal and Data Processing of Small Targets. San Diego (USA), July-Aug. 2001. 24 p.

8. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Pt. IV: Decision-Based Methods // Proc. of SPIE Conf. on Signal and Data Processing of Small Targets. Orlando (USA), Apr. 2002. 24 p.

9. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Pt. V: Multiple-Model Methods // IEEE Trans. on aerospace and electric systems. 2005. Vol. 41, № 4. P. 1255–1321.

10. Willett P., Ruan Y., Steit R. The PMHT: Its problems and some solutions // IEEE Trans. on aerospace and electric systems. 2002. Vol. 38, № 3. P. 738–754. doi: 10.1109/TAES.2002.1039396

11. Кузьмин С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев: КВЦ, 2000. 428 с.

12. Васильев К. К., Маттис А. В. Нелинейная траекторная фильтрация в связанных координатах // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXIV Междунар. науч.-техн. конф., Воронеж, 17–19 апр. 2018. Т. 3. С. 1–8.

13. Нахмансон Г. С., Комягин Б. П. Эффективность обнаружения траекторий движения воздушных целей при вторичной обработке радиолокационной информации // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 4. С. 52–55.

14. Нахмансон Г. С. Пространственная обработка широкополосных сигналов. М.: Радиотехника, 2015. 256 с.

Информация об авторах

Нахмансон Геннадий Симонович – доктор технических наук (1993), заслуженный работник высшей школы РФ (2000), профессор (1992) военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина" (г. Воронеж). Автор более 300 научных трудов. Сфера научных интересов – обработка широкополосных сигналов в радиотехнических системах в условиях внутренних шумов и внешних помех; оптическая обработка сигналов в реальном масштабе времени.

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

E-mail: kig28@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7450-1890>

Акиншин Дмитрий Сергеевич – инженер по специальности "Специальные радиотехнические системы" (2012, Военный авиационный инженерный университет (г. Воронеж)). Адъюнкт военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина" (г. Воронеж). Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – обнаружение траекторий движения воздушных объектов при вторичной обработке радиолокационной информации.

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

E-mail: ads199011@icloud.com

<https://orcid.org/0000-0003-3489-8579>

References

1. *Radiolokatsionnye sistemy: osnovy postroeniya i teoriiya* [Radar Systems: Fundamentals of Construction and Theory], ed. by Ya. D. Shirman. Moscow, Radiotekhnika, 2007, 806 p. (In Russ.)

2. *Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra signalov modulyatsiei nesushchei psevdosluchainoi posledovatel'nost'yu* [Interference Immunity of Radio Communication Systems with Expansion of the Spectrum of Signals by Modulation of the Carrier by a Pseudo-Random Sequence], ed. by V. N. Borisov. Moscow, Radio i svyaz', 2003, 640 p. (In Russ.)

3. Kiselev V. Yu., Monakov A. A. Assessment of Trajectory Processing Algorithms in Air Traffic Control Radar Systems: Track Detection. Radioengineering. 2016, no. 3, pp. 28–36. (In Russ.)

4. Wieneke M., Koch W. The PMHT: Solution for some of its problems. Proc. of SPIE. 2007, vol. 6699, pp. 1–12. doi: 10.1117/12.734388

5. Bar-Shalom Y., Blair W. D. Multitarget-Multisensor Tracking. Applications and Advances. London, Artech House, 2000, vol. 3, 608 p.

6. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Part II: Ballistic Target Models. Proc. of SPIE Conf. on Signal and Data Processing of Small Targets. San Diego (USA), July-August 2001, 23 p.

7. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Part III: Measurement Models. Proc. of SPIE Conf. on Signal and Data Processing of Small Targets. San Diego (USA), July-August 2001, 24 p.

8. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Part IV: Decision-Based Methods. Proc. of SPIE Conf. on Signal and Data Processing of Small Targets. Orlando (USA), April 2002, 24 p.

9. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Part V: Multiple-Model Methods. IEEE Trans. on aerospace and electric systems. 2005, vol. 41, no. 4, pp. 1255–1321.

10. Willett P., Ruan Y., Steit R. The PMHT: Its problems and some solutions. IEEE Trans. on aerospace and electric systems. 2002, vol. 38, no. 3, pp. 738–754. doi: 10.1109/TAES.2002.1039396

11. Kuz'min S. Z. *Tsifrovaya radiolokatsiya. Vvedenie v teoriyu* [Digital Radar. Introduction to Theory]. Kiev, KVITS, 2000, 428 p. (In Russ.)

12. Vasil'ev K. K., Mattis A. V. *Nelineinaya traektor'naya fil'tratsiya v svyazannykh koordinatakh* [Nonlinear Trajectory Filtering in Linked Coordinates]. Radar, Navigation,

Communication. Proc. XXIV Intern. Scientific and Technical Conf. Voronezh, 17–19 April 2018, vol. 3, pp. 1–8. (In Russ.)

13. Nakhmanson G. S., Komyagin B. P. Efficiency of Air Target Motion Path Detecting in Case of Radar Data Secondary Processing. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2017, no. 4, pp. 52–55. (In Russ.)

14. Nakhmanson G. S. *Prostranstvennaya obrabotka shirokopolosnykh signalov* [Spatial Processing of Broadband Signals]. Moscow, Radiotekhnika, 2015, 256 p. (In Russ.)

Information about the authors

Gennady S. Nakhmanson, Dr. Sci. (Eng.) (1993), Distinguished Worker of the Higher School of the Russian Federation (2000), Professor (1992) of the Military Educational and Scientific Center of the Air Force "N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh). The author of more than 300 scientific publications. Area of expertise: the processing of broadband signals in radio systems in conditions of internal noise and external interference; optical processing of signals in real time.

Address: N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy, 54 A Starykh Bolsheviks Str., Voronezh 394064, Russia

E-mail: kig28@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7450-1890>

Dmitry S. Akinshin, Dipl. engineer on "Special Radio Technical Systems" (2012, the Military Aviation Engineering University (Voronezh)). Postgraduate student of the Military Educational and Scientific Center of the Air Force "N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh). The author of three scientific publications. Area of expertise: the detection of trajectories of air objects in the secondary processing of radar information.

Address: N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy, 54 A Starykh Bolsheviks Str., Voronezh 394064, Russia

E-mail: ads199011@icloud.com

<https://orcid.org/0000-0003-3489-8579>

Стробирование радиолокационных отметок при траекторной фильтрации в связанных координатах

К. К. Васильев¹, А. В. Маттис², О. В. Саверкин^{1✉}

¹Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

²АО «НПО "Марс"», Ульяновск, Россия

✉ saverkin-oleg@mail.ru

Аннотация

Введение. Современные воздушные цели, в особенности беспилотные, становятся менее заметными, а их маневренные возможности продолжают совершенствоваться. Для обеспечения эффективного сопровождения высокоманевренных целей актуализируются и алгоритмы траекторной обработки. Поскольку точность фильтрации траекторных параметров во многом определяется достоверностью радиолокационной информации, возрастает роль алгоритмов стробирования. В связи с этим возникает задача повышения эффективности стробирования радиолокационных отметок.

Цель работы. Разработка и исследование эффективности алгоритма траекторного стробирования, основанного на модели движения в скоростной связанной с направлением движения цели системе координат и предполагающего формирование строга в форме усеченного эллипсоидного сектора.

Методы и материалы. Рассмотрены модели движения целей в связанных координатах, которые положены в основу новых алгоритмов траекторного сопровождения, базирующихся на калмановской фильтрации. Рассмотрены существующие методы стробирования радиолокационных отметок от цели и предложен новый подход на основе фильтрации в связанных координатах. Новый алгоритм предполагает формирование строга в форме усеченного эллипсоидного сектора. Такая форма соответствует наиболее вероятному местоположению отметок от сопровождаемой цели. Эффективность предложенных решений подтверждается результатами математического моделирования, выполненного в среде MATLAB.

Результаты. Приведены аналитические выражения для модели движения, рекуррентной фильтрации и алгоритма стробирования в связанных координатах. Проведен сравнительный анализ эффективности сопровождения при одинаковых размерах эллиптического и предложенного строга. Установлено, что для скоростных и высокоманевренных целей алгоритм с построением строга в форме усеченного эллипсоидного сектора обеспечивает до 30 % более длительное сопровождение до первой потери отметки от цели, чем алгоритм с эллиптическим стробированием. Кроме того, средняя продолжительность сопровождения для секторного строга практически не зависит от начальной скорости движения цели, а при значениях погрешностей измерения координат менее 50 м имеет большее значение, чем для эллиптического.

Заключение. Достигнутый результат обеспечивается способностью строга в связанных координатах подстраиваться под направление движения и маневрирование цели, что позволяет осуществлять качественное сопровождение объектов в большем диапазоне скоростей. Построение такого строга также позволит снизить вероятность пропуска радиолокационных отметок от сопровождаемой цели и обеспечит уменьшение числа ложных отметок и отметок, принадлежащих другим траекториям, внутри строга.

Ключевые слова: путевая скорость; курс; угол наклона траектории; связанная система координат; траекторная фильтрация; расширенный фильтр Калмана; стробирование

Для цитирования: Васильев К. К., Маттис А. В., Саверкин О. В. Стробирование радиолокационных отметок при траекторной фильтрации в связанных координатах // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 5. С. 71–79. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-71-79

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 08.07.2019; принята к публикации после рецензирования 16.09.2019; опубликована онлайн 29.11.2019



Strobing of Radar Marks for Trajectory Filtration in a Body-Fixed Frame

Konstantin K. Vasiliev¹, Alexey V. Mattis², Oleg V. Saverkin^{1✉}

¹Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

²JSC «RPA "Mars"», Ulyanovsk, Russia

✉saverkin-oleg@mail.ru

Abstract

Introduction. Modern air targets, particularly drones, are becoming less noticeable, while their manoeuvrability continues to improve. Trajectory processing algorithms have also been improved in order to provide for effective tracking of highly manoeuvring targets. The accuracy of filtering trajectory parameters is largely determined by the reliability of radar information. This has also required an enhanced role for strobe algorithms and the need to increase the effectiveness of strobe radar marks.

Aim. To develop and investigate the efficiency of a trajectory strobe algorithm based on the target motion model in a high-speed coordinate system associated with the direction of the target motion and involving the formation of a strobe in the form of a truncated elliptical sector.

Materials and methods. The study considered the target motion model in the body-fixed frame. This model was taken as the basis for new trajectory filtering algorithms based on Kalman filtering. Existing methods for strobing radar marks of the target were considered and a new approach based on filtering in the body-fixed frame proposed. The new algorithm assumes the formation of a strobe in the form of a truncated elliptical sector. This form corresponds to the most probable location of the marks of the tracked target. The effectiveness of the proposed solutions is confirmed by the results of mathematical modelling carried out using MATLAB.

Results. The study produced analytical expressions for the motion model, recurrent filtering and strobe algorithm in the body-fixed frame. A comparative analysis of tracking effectiveness with the same volumes of the elliptical and proposed strobes was performed. It was established that the algorithm with strobe formation in the shape of a truncated elliptical sector provides for longer target tracking up to the time of the first loss of the mark for speed and highly manoeuvring targets, when compared to the elliptical strobe algorithm. In addition, the average duration of sector strobe tracking does not in practice depend on the initial speed of the target and provides greater accuracy for small measurement error values (less than 50 m) of the coordinates than in comparison with the elliptical one.

Conclusion. The described results were achieved by the ability of the strobe in the body-fixed frame to adapt to the direction of motion and target manoeuvring, allowing high-quality target tracking within a larger speed range. Such strobe formation will also reduce the likelihood of skip-ping radar marks from the tracked target and will reduce the number of false marks belonging to other trajectories inside the strobe.

Key words: ground speed; course; climb angle; body-fixed frame; trajectory filtration; extended Kalman filter; strobing

For citation: Vasiliev K. K., Mattis A. V., Saverkin O. V. Strobing of Radar Marks for Trajectory Filtration in a Body-Fixed Frame. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 5, pp. 71–79. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-71-79

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 08.07.2019; accepted 16.09.2019; published online 29.11.2019

Введение. Создание алгоритмов траекторного сопровождения [1–12] основано на использовании математических моделей, с помощью которых можно с достаточной точностью аппроксимировать реальное движение цели и процесс ее наблюдения. Описание траекторий движения должно отражать динамические свойства различных типов движу-

щихся объектов и обеспечивать возможность построения алгоритмов обработки наблюдений в реальном масштабе времени. Этим условиям удовлетворяет общепризнанное представление траекторий с помощью широкого класса векторных марковских последовательностей. Вместе с тем, недостатком известных моделей является привяз-

ка ускорений объекта наблюдения к базовой прямоугольной системе координат $Oxyz$. Понятно, что направление движения реальной цели и ее возможные маневры, как правило, никак не соотносятся с искусственно введенными координатами.

В связи с этим в работах [13, 14] предложено использовать для описания траекторий связанную с движением цели систему координат. Анализ показал, что при этом может быть повышена эффективность траекторной фильтрации маневрирующих целей [14, 15]. Вместе с тем, при фильтрации в связанных координатах классическая форма эллиптического строга может быть заменена на более соответствующий таким координатам эллипсоидный сектор. В связи с этим цель настоящей статьи – решение задачи построения строга в форме усеченного эллипсоидного сектора. К задачам исследования также относится сравнительный анализ эффективности применения строгов различной формы.

Особенности фильтрации в связанных координатах. Пусть скорость изменения положения объекта определяется в связанной системе координат. В этом случае на i -м измерении необходимо задать (рис. 1) возможное изменение значения путевой скорости v_i и двух углов – курса θ_i , отсчитываемого от оси x по часовой стрелке, и угла наклона траектории (угла набора высоты) $\varphi_i \in (-0.5\pi; 0.5\pi)$, отсчитываемого от проекции вектора скорости на горизонтальную плоскость Oxy : $\varphi_i > 0$, если $v_{zi} > 0$ ($i = 1, 2, \dots$ – номер измерения).

Изменение этих параметров зададим следующими уравнениями авторегрессии:

$$\begin{aligned} v_i &= v_{i-1} + \sigma_v t_i \xi_{vi}; \\ \theta_i &= \theta_{i-1} + \sigma_\theta t_i \xi_{\theta i}; \\ \varphi_i &= \varphi_{i-1} + \sigma_\varphi t_i \xi_{\varphi i}, \end{aligned}$$

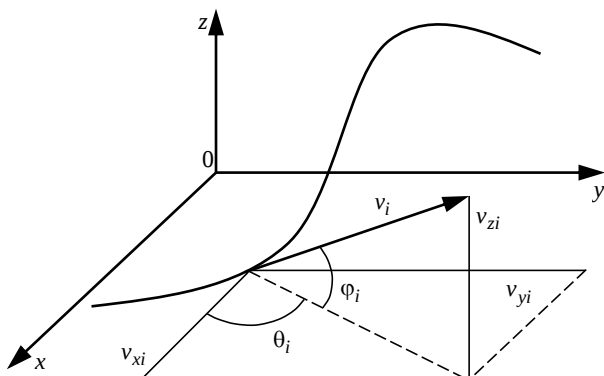


Рис. 1. Задание скорости в связанной системе координат
Fig. 1. The specifying of velocity in the body-fixed frame

где σ_v , σ_θ , σ_φ – среднеквадратические отклонения (СКО) ускорения, скорости изменения курса и скорости изменения угла наклона траектории рассматриваемого класса целей соответственно; t_i – интервал времени между соседними измерениями; ξ_{vi} , $\xi_{\theta i}$, $\xi_{\varphi i}$ – стандартные гауссовские независимые случайные величины. Эти уравнения можно записать в векторной форме:

$$\mathbf{v}_{svi} = \mathbf{v}_{sv(i-1)} + \mathbf{\vartheta}_{vi} \xi_i,$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{svi} &= (v_i, \theta_i, \varphi_i)^T; \\ \mathbf{\vartheta}_{vi} &= \text{diag}(\sigma_v t_i, \sigma_\theta t_i, \sigma_\varphi t_i); \\ \xi_i &= (\xi_{vi}, \xi_{\theta i}, \xi_{\varphi i})^T. \end{aligned}$$

После задания вектора скорости возможны 2 подхода к полному определению моделей движения целей для решения задач имитации траекторий, прогнозирования и фильтрации.

Первый подход состоит в прямом введении скоростей и углов в связанных с движением цели координатах в вектор состояния:

$$\mathbf{S}_{svi} = (x_i, y_i, z_i, v_i, \theta_i, \varphi_i)^T,$$

где

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i-1} + t_i v_{xi}; \\ y_i &= y_{i-1} + t_i v_{yi}; \\ z_i &= z_{i-1} + t_i v_{zi}; \\ v_i &= v_{i-1} + \sigma_v t_i \xi_{vi}; \\ \theta_i &= \theta_{i-1} + \sigma_\theta t_i \xi_{\theta i}; \\ \varphi_i &= \varphi_{i-1} + \sigma_\varphi t_i \xi_{\varphi i}, \end{aligned} \quad (1)$$

причем $v_{xi} = v_i \cos \theta_i \cos \varphi_i$; $v_{yi} = v_i \sin \theta_i \cos \varphi_i$; $v_{zi} = v_i \sin \varphi_i$ – проекции вектора скорости движения на координатные оси.

На рис. 2 представлены характерные реализации, полученные с помощью связанной модели при двух наборах параметров. Анализ многих реализаций показывает лучшее сходство с реальными траекториями движения маневрирующих воздушных целей. Очень важно, что для рассматриваемых связанных моделей необходимо задавать параметры σ_v , σ_θ , σ_φ , не зависящие от направления координатных осей и определяемые только типом цели.

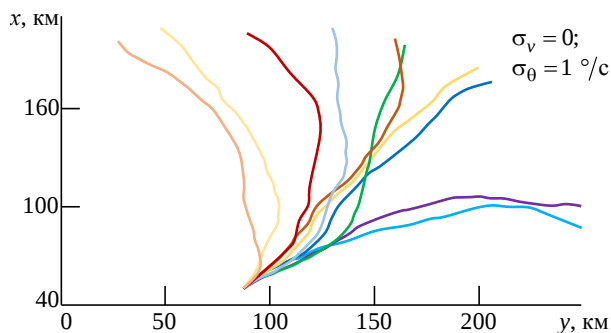
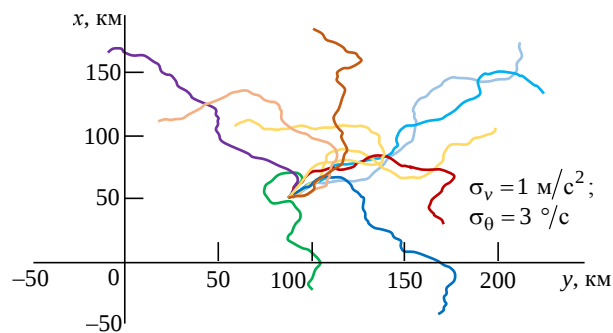


Рис. 2. Характерные траектории движения целей на плоскости

Fig. 2. Characteristic trajectories of the targets motion on the plane



Предложенная модель имеет 2 существенных отличия от классической линейной модели. Прежде всего, выражения (1) относятся к классу векторных нелинейных стохастических разностных уравнений:

$$\mathbf{S}_{\text{св}i} = \phi_i[\mathbf{S}_{\text{св}(i-1)}] + \mathbf{g}_{vi}\bar{\xi}_i; \quad i = 1, 2, \dots,$$

где $\phi_i[\mathbf{S}_{\text{св}(i-1)}]$ – нелинейная векторная функция вектора состояния $\mathbf{S}_{\text{св}(i-1)}$, определяемая (1). Поэтому прогноз (экстраполяция) вектора состояния на i -м шаге наблюдения определяется по формуле

$$\hat{\mathbf{S}}_{\text{св.э}i} = \phi_i[\hat{\mathbf{S}}_{\text{св}(i-1)}],$$

а ковариационная матрица ошибок – как

$$P_{\text{э}i} = \phi_i'[\hat{\mathbf{S}}_{\text{св}(i-1)}]P_{i-1}\phi_i^T[\hat{\mathbf{S}}_{\text{св}(i-1)}] + \mathbf{g}_{vi}Q_i\mathbf{g}_{vi}^T, \quad (2)$$

где

$$\phi_i'[\mathbf{S}_{\text{св}(i-1)}] = d\phi_i[\mathbf{S}_{\text{св}(i-1)}]/d\mathbf{S}_{\text{св}(i-1)};$$

$P_{i-1} = P_{\text{э}(i-1)}[E + C^T B_{i-1}^{-1} C P_{\text{э}(i-1)}]^{-1}$ – ковариационная матрица ошибок оценивания; $Q_i = M\{\xi_i \xi_i^T\}$, причем E – единичная матрица; C – матрица преобразования наблюдений; M – символ математического ожидания; символом ${}^{\wedge}$ здесь и далее отмечены результаты оценивания соответствующих величин.

Оценивание выполняется согласно известному выражению для фильтра Калмана [14, 15]:

$$\hat{\mathbf{S}}_{\text{св}i} = \hat{\mathbf{S}}_{\text{св.э}i} + P_i C^T B_i^{-1} (\mathbf{z}_i - C \hat{\mathbf{S}}_{\text{св.э}i}),$$

где $\mathbf{z}_i$ – модель наблюдений.

При этом предполагается, что наблюдения производятся в декартовой системе. В этом случае модель наблюдений имеет вид $\mathbf{z}_i = C \mathbf{S}_{\text{св}i} + \mathbf{n}_i$,

где $\mathbf{n}_i = (n_{xi} \ n_{yi} \ n_{zi})^T$ – аддитивный шум с нулевым средним и ковариационной матрицей

$$B_i = \begin{pmatrix} \sigma_{nxi}^2 & b_{xyi} & b_{xzi} \\ b_{xyi} & \sigma_{nyi}^2 & b_{yzi} \\ b_{xzi} & b_{yzi} & \sigma_{nzi}^2 \end{pmatrix},$$

причем σ_{nxi} , σ_{nyi} , σ_{nzi} – СКО наблюдений координат x , y , z соответственно; b_{xyi} , b_{yzi} , b_{xzi} – ковариации соответствующих наблюдений [15].

Матрица преобразований в декартовой системе имеет вид

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Поскольку при работе радиолокационной станции (РЛС) позиция цели обычно фиксируется в сферических координатах, перед началом траекторной обработки необходимо выполнить соответствующие преобразования [15].

На основе предложенной модели описания движения с учетом модели наблюдений, зависящей от типа РЛС, могут быть построены разнообразные алгоритмы квазилинейного рекуррентного оценивания изменяющихся координат цели. Примеры таких алгоритмов и результаты их сравнительного анализа приведены в [14, 15]. При этом установлено, что фильтрация в связанной системе координат приводит к выигрышу по точности оценивания параметров движения цели.

Алгоритмы стробирования. В декартовой системе координат строб представляет собой эллипсоид, определяемый ковариационными матрицами ошибок наблюдения и ошибок прогнозирования положения цели [5, 7].

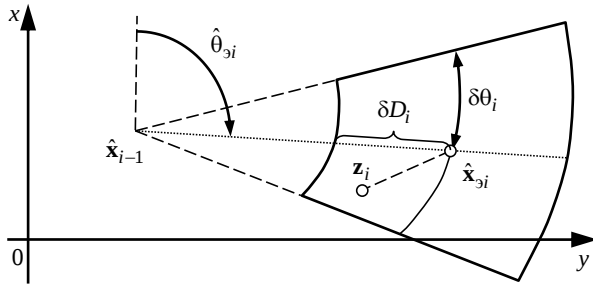


Рис. 3. Вид строба в связанных координатах на плоскости
Fig. 3. Shape of the strobe in the body-fixed frame on the plane

Фильтрация в связанных координатах [14, 15] предполагает создание строба в виде усеченного эллиптического сектора (рис. 3, для случая двух измерений). Размеры строба определяются уровнем допустимых отклонений $\Delta S_{свi} = (\Delta D_i, \Delta \theta_i, \Delta \varphi_i)^T$ по дальности, курсу и по углу наклона траектории соответственно.

Указанные отклонения рассчитываются при определении ковариационной матрицы ошибок прогнозирования (2). Для получения необходимых отклонений из состава полученной матрицы выделяют ковариации ошибок прогнозирования координат:

$$P_{\vartheta xi} = \begin{pmatrix} P_{\vartheta 11i} & P_{\vartheta 12i} & P_{\vartheta 13i} \\ P_{\vartheta 21i} & P_{\vartheta 22i} & P_{\vartheta 23i} \\ P_{\vartheta 31i} & P_{\vartheta 32i} & P_{\vartheta 33i} \end{pmatrix} = C P_{\vartheta i} C^T.$$

Ковариационная матрица отклонений радиолокационных отметок от экстраполированных координат цели в связанной системе координат определяется как

$$\begin{aligned} M\{\varepsilon_{свi} \varepsilon_{свi}^T\} &= \\ &= M\{T_i(z_i - C \hat{S}_{св. \vartheta i})(z_i - C \hat{S}_{св. \vartheta i})^T T_i^T\} = \\ &= T_i(P_{\vartheta xi} + B_i)T_i^T, \end{aligned}$$

где $\varepsilon_{свi} = (\varepsilon_{Di}, \varepsilon_{\theta i}, \varepsilon_{\varphi i})^T$ – отклонения на связанных осях;

$$T_i = \begin{pmatrix} \cos \hat{\theta}_{\vartheta i} \cos \hat{\varphi}_{\vartheta i} & -\sin \hat{\theta}_{\vartheta i} \cos \hat{\varphi}_{\vartheta i} & -\cos \hat{\theta}_{\vartheta i} \sin \hat{\varphi}_{\vartheta i} \\ \sin \hat{\theta}_{\vartheta i} \cos \hat{\varphi}_{\vartheta i} & \cos \hat{\theta}_{\vartheta i} \cos \hat{\varphi}_{\vartheta i} & -\sin \hat{\theta}_{\vartheta i} \sin \hat{\varphi}_{\vartheta i} \\ \sin \varphi_{\vartheta i} & 0 & \cos \hat{\varphi}_{\vartheta i} \end{pmatrix}$$

– матрица поворота координат.

Поскольку взаимная ковариация наблюдений в алгоритме не учитывается, ковариационная матрица шума наблюдений имеет вид

$$B_i = \begin{pmatrix} \sigma_{nxi} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{nyi} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{nzi} \end{pmatrix}.$$

Полученные значения ошибок прогнозирования в связанных координатах $(\sigma_{Di}, \sigma_{\theta i}, \sigma_{\varphi i})$ определяют линейные размеры строба:

$$\delta_{Di} = \gamma \sigma_{Di}; \quad \delta_{\theta i} = \gamma \sigma_{\theta i}; \quad \delta_{\varphi i} = \gamma \sigma_{\varphi i},$$

которые связаны с допустимыми отклонениями следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta_{Di} &= \Delta D_i; \\ \delta_{\theta i} &= \left| \left(\hat{S}_{св. \vartheta i} - \hat{S}_{св. (i-1)} \right) \right| \Delta \theta_i; \\ \delta_{\varphi i} &= \left| \left(\hat{S}_{св. \vartheta i} - \hat{S}_{св. (i-1)} \right) \right| \Delta \varphi_i, \end{aligned}$$

причем параметр γ выбирается по заданной вероятности пропуска отметки от цели, как правило, в интервале 2...3.

В результате полученные форма и размеры строба соответствуют наиболее вероятному местоположению цели в следующий момент времени наблюдения.

Сравнительный анализ эффективности стробирования. Исследование предложенного алгоритма стробирования (ПАС) выполнялось математическим моделированием на ЭВМ и проводилось для случая двух измерений. Исследовалась эффективность ПАС в сравнении с известным алгоритмом стробирования (ИАС) при одинаковых площадях секторного и эллиптического стробов, что обеспечивает равные вероятности попадания в них ложных отметок.

Для оценки эффективности применения ИАС и ПАС в среде MATLAB была построена математическая модель, позволяющая:

- имитировать различные траектории движения воздушных объектов;
- имитировать наблюдения от РЛС с заданными точностными характеристиками;
- выполнять траекторную фильтрацию полученных наблюдений с применением простого линейного фильтра Калмана и линейного фильтра Калмана с подстройкой в связанных координатах;
- формировать стробы в форме эллипса и усеченного сектора и оценивать положение отметки от цели относительно границ стробов;
- отображать исходную траекторию цели, наблюдения, полученные от имитируемой РЛС, и результаты обработки радиолокационной информации;

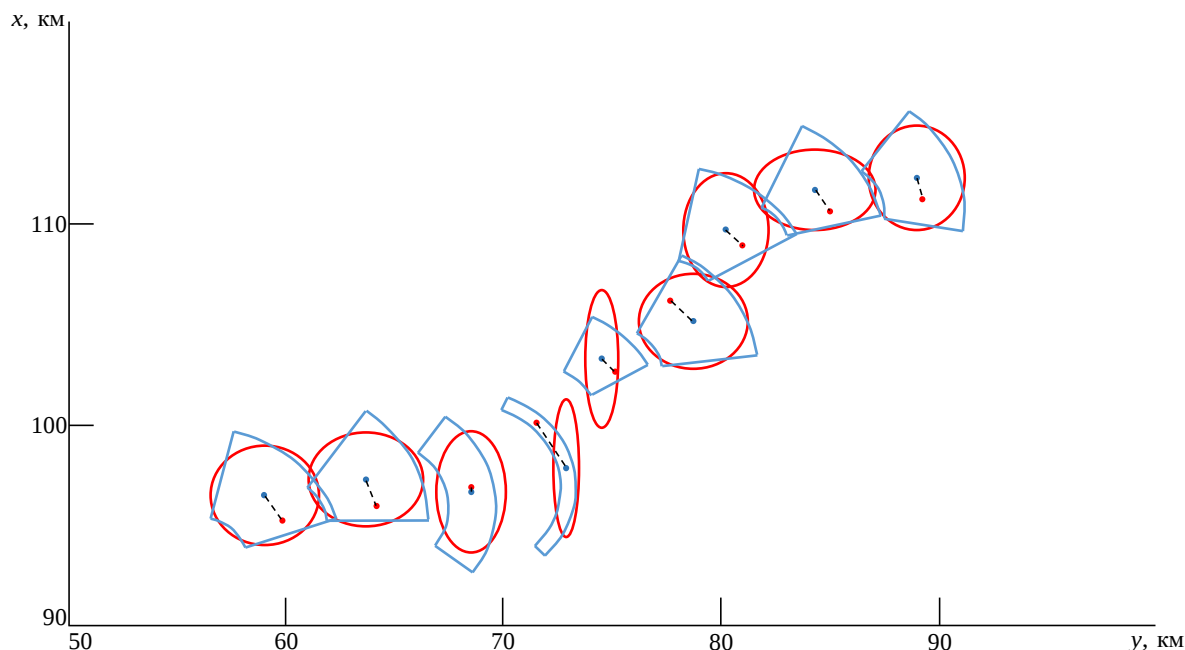


Рис 4. Положение и внешний вид стробов при маневре цели.
Голубыми линиями ограничены стробы ПАС, красными – стробы ИАС.
Синие маркеры – центры стробов; красные маркеры – отметки от цели

Fig. 4. Position and shape of strobes for maneuvering target.
Blue lines limit the strobes of the proposed algorithm; red lines limit the strobes of the known algorithm.
Blue markers is the strobes centers; red markers is the position of the target

– отображать зависимости среднего времени сопровождения от размеров строба для ИАС и ПАС.

Дополнительно для визуализации полученных результатов в среде Qt Creator на языке C++ с использованием алгоритмов из модели, реализованной в MATLAB, разработана программа:

– для имитации и графического построения различных траекторий движения воздушных объектов;

– имитации и графического построения наблюдений от РЛС с заданными точностными характеристиками;

– траекторной фильтрации полученных наблюдений и графического построения восстановленных траекторий и прогнозируемых отметок;

– графического построения рассчитанных стробов в форме эллипса и усеченного сектора.

На рис. 4 представлены отметки сопровождаемой цели с различными стробами при $\gamma=3$. Моделирование отметок производилось в декартовых координатах с СКО наблюдений 10 м по каждой координате. РЛС располагалась в начале координат. Цель двигалась курсом 45° с начальной скоростью 300 м/с, ускорением 1 м/с^2 и скоростью изменения курса $3^\circ/\text{с}$. Для выполнения траекторной фильтрации использовался фильтр с

раздельным оцениванием в связанных координатах [15], настроенный на сопровождение объекта, перемещающегося с указанными параметрами движения.

На рис. 4 показано, что объект выполняет маневрирование по курсу и в момент поворота эллиптический строб ИАС теряет отметку от цели. Такой эффект объясняется динамикой движения объекта в момент стробирования.

Для оценки эффективности алгоритмов стробирования в ходе моделирования оценивалось среднее время сопровождения цели до первой потери отметки T_{ac1} для стробов ИАС и ПАС идентичного размера. Оба фильтра настроены на сопровождение цели с указанными ранее параметрами движения.

На рис. 5 представлены результаты, полученные при имитации движения цели с параметрами, совпадающими с настройкой фильтров. При малом размере строба ($\gamma \leq 2$) алгоритмы имеют близкие значения средней продолжительности сопровождения до первой потери отметки от цели. По мере роста значения коэффициента γ , сопровождающегося увеличением размеров стробов, среднее время сопровождения ПАС все больше превышает аналогичный показатель ИАС.

На рис. 6 показаны результаты, полученные

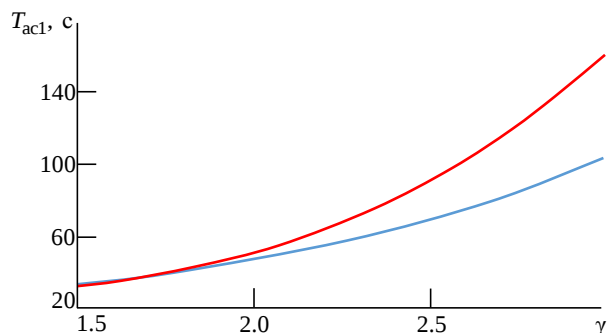


Рис. 5. Зависимость среднего времени сопровождения цели ИАС и ПАС от значения коэффициента γ . Красная линия – ПАС; синяя линия – ИАС

Fig. 5 Dependence of the average object tracking time on the value of the coefficient γ for the proposed algorithm (red line) and known algorithm (blue line)

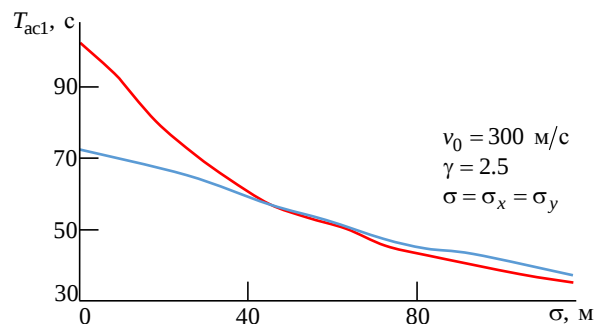


Рис. 6. Зависимость среднего времени сопровождения объекта для ИАС (синяя линия) и ПАС (красная линия) от погрешности измерения координат

Fig. 6. Dependence of the average object tracking time on the measurement error of coordinates for the proposed algorithm (red line) and known algorithm (blue line)

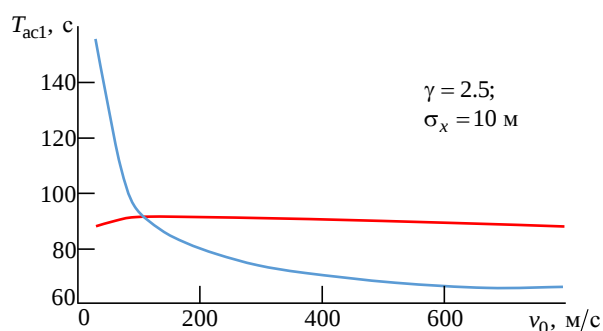


Рис. 7. Зависимость среднего времени сопровождения объекта для ИАС (синяя линия) и ПАС (красная линия) от начальной скорости

Fig. 7. Dependence of average object tracking time on initial speed for the proposed algorithm (red line) and known algorithm (blue line)

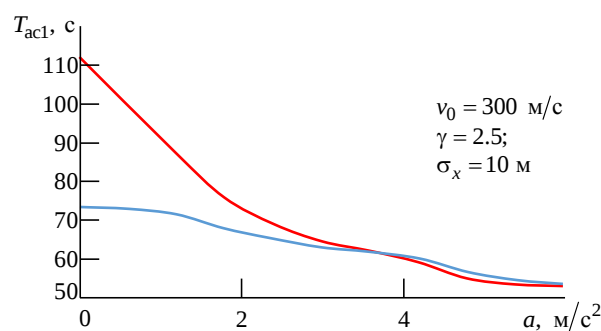


Рис. 8. Зависимость среднего времени сопровождения объекта для ИАС (синяя линия) и ПАС (красная линия) от ускорения

Fig. 8. Dependence of average object tracking time on acceleration for the proposed algorithm (red line) and known algorithm (blue line)

при $\gamma = 2.5$ для движения цели с начальной скоростью 300 м/с при различных значениях погрешности измерения координат (погрешности измерения обеих координат положены равными). Полученные результаты позволяют сделать вывод, что ПАС имеет преимущество при значениях $\sigma_x < 50$ м. При больших значениях погрешности измерения координат оба алгоритма имеют близкое значение среднего времени сопровождения, причем с ростом погрешности это значение снижается.

На рис. 7 представлены графики, полученные при $\gamma = 2.5$ для движения цели с различной начальной скоростью и погрешностью измерения координат 10 м. Видно, что при скорости менее 100 м/с ИАС имеет преимущество, однако с ростом скорости значение среднего времени сопровождения стремится к установившемуся значению. При этом среднее время ПАС практически не зависит от начальной скорости и превосходит (в среднем на 20 с) установившееся значение ИАС.

На рис. 8 представлены зависимости $T_{ac1}(a)$ для движения с различным ускорением, полученные при фиксированном значении начальной скорости $v_0 = 300$ м/с; $\gamma = 2.5$ и $\sigma_x = 10$ м. Из полученных графиков можно сделать вывод, что с ростом динамики движения значение среднего времени сопровождения снижается для обоих алгоритмов, причем ПАС уступает ИАС.

Заключение. Установлено, что для скоростных и высокоманевренных целей ПАС, реализуемый в координатах, связанных с отслеживаемой целью, с построением строга в форме усеченного эллипсоидного сектора, обеспечивает более длительное сопровождение до первой потери отметки от цели, чем ИАС с эллиптическим строгом, реализуемый в не связанных с целью координатах. ИАС имеет преимущество в средней продолжительности времени сопровождения только при наблюдении за низкоскоростными объектами, характер движения которых близок к прямолинейному. Также установлено, что средняя про-

должительность сопровождения для ПАС практически не зависит от начальной скорости движения цели, а при малых погрешностях измерения координат имеет большее значение, чем для ИАС. Такие результаты объясняются тем, что в ПАС осуществляется подстройка размеров и формы строба в зависимости от характера движения: при интенсивном маневрировании сектор-

ный строб вытягивается по курсу, а при прямолинейном движении с ускорением – вытягивается вдоль траектории. В итоге такой строб лучше, чем эллипсоид ИАС, охватывает область наиболее вероятного местоположения цели, что позволяет осуществлять качественное сопровождение объектов в большем диапазоне скоростей.

Список литературы

1. Li X. R., Jilkov V. P. Survey of Maneuvering Target Tracking: Dynamic Models // Signal and Data Processing of Small Targets 2000. Orlando, FL, United States, 13 July 2000. (Proc. SPIE. Vol. 4048). doi: 10.1117/12.391979
2. Bar-Shalom Y., Li X. R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation. Hoboken, NJ: Wiley & Sons, 2001. 256 p. doi: 10.1002/0471221279
3. Bar-Shalom Y., Willett P. K., Tian X. Tracking and Data Fusion: a Handbook of Algorithms. Storrs: YBS Publishing, 2011. 1236 p.
4. Chui C. K., Chen G. Kalman Filtering with Real-Time Applications. Berlin: Springer-Verlag, 2017. 240 p.
5. Выбор вида и параметров стробов при отождествлении координатной информации от средств обнаружения воздушных целей в комплексе средств автоматизации батарейного командного пункта / Э. В. Зябиров, А. В. Аравин, С. В. Михайлов, И. П. Филюшкин // Изв. вузов. Поволжский регион. 2018. № 4 (48). С. 88–95. doi: 10.21685/2072-3059-2018-4-8
6. Афанасьев Б. В., Афанасьев В. В. Процедура комплексной обработки радиолокационных данных в стробе и выбора радиолокационной метки // Вестн. Гос. ун. морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2018. Т. 10, № 3. С. 608–618. doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-608-618
7. Беляев А. В., Карташов В. М., Лутуангу Ф. А. Стробирование отметок движущихся объектов в системе обработки изображений со стационарной видеокамерой // Scientific J. ScienceRise. 2017. № 3 (32). С. 66–71. doi: 10.15587/2313-8416.2017.96524
8. Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации: в 2 ч. Ч. 1. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. 164 с.
9. Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации: в 2 ч. Ч. 2. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. 180 с.
10. Рязанцев Л. Б. Многомодельное байесовское оценивание вектора состояния маневренной воздушной цели в дискретном времени // Вестн. ТГТУ. 2009. Т. 15, № 4. С. 729–739.
11. Антропов В. В., Мазиков Е. Б. Алгоритм вторичной обработки информации при траекторном распознавании // Материалы III Междунар. науч.-практ. конф. "Наука, образование, общество: тенденции и перспективы развития", Чебоксары, 11 дек. 2016. Чебоксары: ЦНС "Интерактив плюс", 2016. С. 13–21. doi: 10.21661/r-115874
12. Vaseghi S. V. Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction. 4th ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2008. 514 p. doi: 10.1002/9780470740156
13. Васильев К. К., Маттис А. В. Связанные стохастические модели движения радиолокационных целей // Автоматизация процессов управления. 2017. № 4 (50). С. 14–18.
14. Васильев К. К., Маттис А. В. Траекторная фильтрация в связанных координатах // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2018. № 11. С. 11–18
15. Маттис А. В., Саверкин О. В. Эффективность траекторной фильтрации в связанных координатах // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2018. № 11. С. 19–24. doi: 10.18127/j20700814-201811-04

Информация об авторах

Васильев Константин Константинович – доктор технических наук (1985), профессор (1987) кафедры телекоммуникации Ульяновского государственного технического университета. Автор 508 научных работ. Сфера научных интересов – статистический синтез и анализ информационных систем. Адрес: Ульяновский государственный технический университет, ул. Северный Венец, д. 32, Ульяновск, 432027, Россия E-mail: vkk@ulstu.ru

Маттис Алексей Валерьевич – кандидат технических наук (2010), главный конструктор ФНПЦ АО «НПО "Марс"». Автор 40 научных работ. Сфера научных интересов – системы автоматического управления. Адрес: 2ФНПЦ АО «НПО "Марс"», ул. Солнечная, д. 20, Ульяновск, 432022, Россия E-mail: mattisav@rambler.ru

Саверкин Олег Владимирович – инженер по специальности "Сети связи и системы коммутации" (2014, Ульяновский государственный технический университет), аспирант кафедры телекоммуникации Уль-

яновского государственного технического университета. Автор 26 научных работ. Сфера научных интересов – статистическая обработка сигналов.

Адрес: Ульяновский государственный технический университет, ул. Северный Венец, д. 32, Ульяновск, 432027, Россия

E-mail: saverkin-oleg@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6730-0003>

References

1. Li X. R., Jilkov V. P. Survey of Maneuvering Target Tracking: Dynamic Models. Signal and Data Processing of Small Targets 2000. Orlando, FL, United States, 13 July 2000. Proc. SPIE, vol. 4048. doi: 10.1117/12.391979
2. Bar-Shalom Y., Li X. R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation. Hoboken, NJ, Wiley & Sons, 2001, 256 p. doi: 10.1002/0471221279
3. Bar-Shalom Y., Willett P. K., Tian X. Tracking and Data Fusion: a Handbook of Algorithms. Storrs, YBS Publishing, 2011, 1236 p.
4. Chui C. K., Chen G. Kalman Filtering with Real-Time Applications. Berlin, Springer-Verlag, 2017, 240 p.
5. Zyabirov E. V., Aravin A. V., Mikhaylov S. V., Filyushkin I. P. The Choice of the Form and Parameters of Strokes at the Identification of Coordinate Information from Air Target Sensors in a Complex of Automation Equipment of a Battery Command Post. University Proceedings. Volga region. Technical sciences. 2018, no. 4 (48), pp. 88–95. doi: 10.21685/2072-3059-2018-4-8 (In Russ.)
6. Afanasev B., Afanasev V. Procedure of Complex Processing Radar Data in Strobe and Selection of Radar Mark. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala s.o. makarova*. 2018, no. 3(49), pp. 608–618. doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-608-618 (In Russ.)
7. Belyaev A. V., Kartashov V. M., Lutuangu F. A. Strobing the Moving Objects Marks in the Image Processing Sys-tem with Stationary Video Camera. Science Rise, 2017, no. 1 (32), pp. 66–71. doi: 10.15587/2313-8416.2017.96524 (In Russ.)
8. Konovalov A. A. *Osnovy traektornoi obrabotki radio-lokatsionnoi informatsii v 2 chastyakh* [Basics of Trajectory Processing of Radar Information]. SPb., Publishing house of ETU, 2014, pt. 1, 164 p. (In Russ.)
9. Konovalov A. A. *Osnovy traektornoi obrabotki radio-lokatsionnoi informatsii v 2 chastyakh* [Basics of trajectory processing of radar information]. SPb., Publishing house of ETU, 2014, pt. 2, 180 p. (In Russ.)
10. Ryazantsev L. B. Multi-Model Bayesian Estimation of Maneuvering Air Target Vector in Discrete Time. Transactions TSTU, 2009, vol.15, no. 4, pp. 729–739. (In Russ.)
11. Antropov V. V., Mazakov E. B. Algorithm of Secondary Information Processing Under a Trajectory Identification. Proc. 3d International Scientific and Practical Conf. Science, Education, Society: Tendencies and Future Development. Cheboksary, 11 December 2016. Cheboksary, SCC "Interaktiv plus", 2016, pp. 13–21. doi: 10.21661/r-115874 (In Russ.)
12. Vaseghi S. V. Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction, Fourth Edition. John Wiley & Sons Ltd, 2008, 514 p.
13. Vasiliev K. K., Mattis A. V. Associated Stochastic Models of Radar Target Movement. Automation of Control Processes. 2017, no. 4 (50), pp. 14–18. (In Russ.)
14. Vasiliev K. K., Mattis A. V. Trajectory Estimation in the Body-Fixed Frame. Journal Information-Measuring and Control Systems. 2018, no. 11, pp. 11–18. (In Russ.)
15. Mattis A.V., Saverkin O.V. Trajectory Estimation in the Body-Fixed Frame. Journal Information-Measuring and Control Systems. 2018, no. 11, pp. 19–24. doi: 10.18127/j20700814-201811-04 (In Russ.)

Information about the authors

Konstantin K. Vasiliev, Dr. Sci. (Eng.) (1985), Professor (1987) of the Department of Telecommunication of Ulyanovsk State Technical University. The author of 508 scientific publications Area of expertise: statistical synthesis and analysis of information systems.

Address: Ulyanovsk State Technical University, 32 Severny Venetz Str., Ulyanovsk 432027, Russia

E-mail: vk@ulstu.ru

Alexey V. Mattis, Cand. Sci. (Eng.) (2010), Design manager of FRPC JSC RPA "Mars". The author of 40 scientific publications. Area of expertise: automatic control systems.

Address: FRPC JSC RPA "Mars", 20 Solnechnaya Str., Ulyanovsk 432022, Russia

E-mail: mattisav@rambler.ru

Oleg V. Saverkin, Dipl.-engineer on telecommunication (2014, Ulyanovsk State Technical University), post-graduate student of the Department of Telecommunication of Ulyanovsk State Technical University. The author of 26 scientific publications Area of expertise: statistical processing of signals

Address: Ulyanovsk State Technical University, 32 Severny Venetz Str., Ulyanovsk 432027, Russia

E-mail: saverkin-oleg@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6730-0003>

Кремниевая электронно-чувствительная *pin*-линейка, облучаемая с обратной стороны

М. Р. Айнбунд¹, Д. Е. Миронов¹, А. В. Пашук¹, В. И. Зубков²✉,
А. В. Соломонов², В. В. Забродский³, А. В. Николаев³

¹АО «ЦНИИ "Электрон"», Санкт-Петербург, Россия

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

³Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

✉vzubkovspb@mail.ru

Аннотация

Введение. В последние десятилетия в фотоэлектронике особое внимание уделяется разработке полупроводниковых матричных фотоприемных устройств, которые фактически стали эффективной альтернативой существующим аналоговым телевизионным приемным системам. Среди таких устройств линейные позиционно-чувствительные датчики применяются для регистрации быстрых изменений в окружающей обстановке и их последующей обработки (например, быстродействующие локаторы летательных аппаратов).

Цель работы. Создание линейки кремниевых *pin*-диодов для использования в составе гибридного детектора ИК-излучения с целью регистрации фотоэлектронов с временным разрешением лучше 10 нс. Моделирование основных электрофизических характеристик линейки.

Материалы и методы. В разрабатываемом приборе регистрация фотоэлектронов обеспечивается за счет наличия приповерхностного поля при использовании p^{++} - p -перехода, сформированного диффузией бора в кремний с удельным сопротивлением 3 кОм · см. Тянущее поле, в свою очередь, также формируется в области объемного заряда между p^{++} - и n^{++} -областями. Для создания n^{++} -области проводилась диффузия фосфора. Численные расчеты распределения потенциала, концентрации свободных носителей заряда и токов проводились в программных пакетах одномерного (SimWin) и двумерного (TCAD Synopsys) моделирования.

Результаты. Проведен двумерный расчет распределения концентрации свободных носителей заряда и потенциала в исследуемой *pin*-структуре. Определены минимальные напряжения, обеспечивающие полное обеднение i -слоя, в том числе для случая продольной канавки различной глубины. Линейка тестировалась в составе гибридного фотоэлектронного прибора облучением световыми импульсами от ИК-светодиода. При напряжении на диодах линейки –270 В достигнута длительность фронта сигнала на всех каналах 5...9 нс.

Заключение. Для гибридного детектора ИК-излучения разработана линейка из 12 кремниевых *pin*-диодов, с размерами чувствительной области элемента 24 × 0.2 мм. По результатам исследований импульсной характеристики показано, что без операции утонения достигнута длительность фронта сигнала на всех каналах, удовлетворяющая требованиям к быстродействующему позиционно-чувствительному датчику ИК-излучения.

Ключевые слова: гибридный фотоэлектронный прибор, кремниевая электронно-чувствительная линейка *pin*-диодов, ИК-фотоприемник

Для цитирования: Кремниевая электронно-чувствительная *pin*-линейка, облучаемая с обратной стороны / М. Р. Айнбунд, Д. Е. Миронов, А. В. Пашук, В. И. Зубков, А. В. Соломонов, В. В. Забродский, А. В. Николаев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 5. С. 80–92. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-80-92

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность О. Е. Фоминскому за помощь в проведении расчетов в пакете моделирования TCAD Synopsys.

Статья поступила в редакцию 21.06.2019; принята к публикации после рецензирования 16.08.2019; опубликована онлайн 29.11.2019

© Айнбунд М. Р., Миронов Д. Е., Пашук А. В., Зубков В. И., Соломонов А. В., Забродский В. В., Николаев А. В., 2019

Back-Side Electron-Bombarded Silicon *pin*-Strip

Mikhail R. Ainbund¹, Denis E. Mironov¹, Andrey V. Pashuk¹,
Vasily I. Zubkov^{2✉}, Alexander V. Solomonov²,
Vladimir V. Zabrodskii³, Andrey V. Nikolaev³

¹JSC "NRI "Electron", St Petersburg, Russia

²Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

³Ioffe Institute, St Petersburg, Russia

✉ vzubkovspb@mail.ru

Abstract

Introduction. In recent decades, in the field of photoelectronics, special attention has been paid to the development of semiconductor matrix photodetectors. These detectors have become an effective alternative to existing television receiving systems. Among such devices, linear position-sensitive sensors are used in cases where the rapid registration of changes to the environment is required (for instance, high-speed locators for flying vehicles).

Aim. To develop a strip of silicon *pin*-diodes as part of a hybrid IR-detector for effective registration of photoelectrons with time resolution less than 10 ns, as well as to model the key electro-physical characteristics of the strip.

Materials and methods. In the device under development, the registration of photoelectrons is achieved by the presence of a near-surface field using p^{++} - p junction formed by diffusion of boron into the silicon with resistivity of $3 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$. The pulling field is also formed in the space charge region between p^{++} - and n^{++} -regions. Diffusion of phosphorus was carried out to create the n^{++} -region. Numerical calculations of potential distribution, concentration of free charge carriers and currents were carried out using software for 1D- and 2D-modelling (SimWin and TCAD Synopsys).

Results. 2D-calculation of charge carrier concentration and potential distribution was performed. The study determined the minimum bias for the complete depletion of the i -layer, including that for longitudinal grooves of various depths. The strip was tested as part of a hybrid photoelectric device by irradiating light pulses from IR LED. When the voltage on the diodes was reached $\sim 270 \text{ V}$, the duration of the signal front on all channels was 5...9 ns.

Conclusion. For use in IR-hybrid detectors, a strip of 12 silicon *pin*-diodes was developed with a sensitive element of $24 \times 0.2 \text{ mm}$ in dimension. The study of pulse characteristics showed that the necessary duration of the front signal on all channels was achieved without thinning thus satisfying the requirements for high-speed position-sensitive sensor of the infrared radiation.

Key words: hybrid photoelectric device, Si *pin*-strip electron-bombarded charge-coupled device, IR-photosensor

For citation: Ainbund M. R., Mironov D. E., Pashuk A. V., Zubkov V. I., Solomonov A. V., Zabrodskii V. V., Nikolaev A. V. Back-Side Electron-Bombarded Silicon *pin*-Strip. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 5, pp. 80–92. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-80-92

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments. The authors are grateful to O. E. Fominsky for his help in making calculations in TCAD Synopsys simulation package.

Submitted 21.06.2019; accepted 16.08.2019; published online 29.11.2019

Введение. В последние десятилетия в фотоэлектронике особое внимание уделяется разработке полупроводниковых матричных фотоприемных устройств (focal plane arrays – FPA). С применением микроэлектронных схем опроса и обработки матричные устройства становятся эффективной альтернативой существующим анало-

говым телевизионным приемным системам [1–5].

Среди таких устройств можно выделить линейные фотоприемные приборы, представляющие собой линейку позиционно-чувствительных к излучению датчиков. Они применяются там, где требуется быстрая (единицы–десятки наносекунд) регистрация изменений окружающей об-

становки с соответствующей обработкой реакции (например, локаторы управляемых и неуправляемых летательных аппаратов).

В технологии матричных полупроводниковых устройств наблюдается устойчивая тенденция к миниатюризации. Однако с уменьшением геометрических размеров пикселей увеличивается плотность металлических проводников, а также поликремниевых слоев, и, как следствие, снижается доля экспонируемой площади фотоприемника. Поэтому в последнее время популярной становится архитектура фотоприемного устройства с освещением со стороны подложки, на которой нет металлической разводки и структурных покрытий (backside (BS)-структуры) [3, 6, 7].

В таких перевернутых структурах падающие на обратную поверхность фотоны в результате поглощения осуществляют генерацию электронно-дырочных пар (внутренний фотоэффект), при этом электроны в приложенной разности потенциалов двигаются к чувствительным ячейкам (к p – n -переходам) на противоположной стороне. Недостатком данной конструкции является невысокая энергия падающих фотонов (порядка ширины запрещенной зоны материала), в результате чего один фотон генерирует одну электронно-дырочную пару. Более перспективной рассматривается архитектура прибора, состоящего из отдельных фотокатода и анода (подобие фотозлектронного умножителя) [7, 8]. В нем отдельно функционирующий фотокатод служит детектором падающих фотонов в нужном диапазоне длин волн, а BS-кристалл с матрицей регистрирующих пикселей облучается фотоэлектронами, вылетающими из фотокатода (внешний фотоэффект). В таком случае приложением ускоряющего поля между фотокатодом и анодом можно достичь энергии фотоэлектронов в несколько килоэлектрон-вольт. Эти фотоэлектроны, бомбардируя поверхность полупроводникового p – n -анода, обеспечивают рождение сотен электронно-дырочных пар в объеме полупроводника, что определяет высокий коэффициент усиления прибора [8, 9].

Структура изготовленной кремниевой линейки pin -фотоприемников. Целью работ было создание линейки кремниевых pin -диодов, которая в составе гибридного детектора ИК-излучения должна обеспечивать эффективную регистрацию фотоэлектронов с энергией 1...5 кэВ и временным разрешением лучше 10 нс. В каче-

стве базы выбран кремний p -типа электропроводности, так как электроны (неосновные носители заряда в p -Si) обладают большей подвижностью, чем дырки. Удельное сопротивление кристалла 3000 Ом·см [10].

Современные кремниевые детекторы регистрируют электроны, начиная от энергии 200...600 эВ (энергетический порог регистрации) до десятков килоэлектрон-вольт и более. При взаимодействии высокоэнергетичных электронов с твердотельными детекторами реализуется многократное упругое и неупругое рассеяние электронов в кристаллической решетке [11, 12], приводящее к смене траектории их движения, вплоть до возможности выхода части электронов обратно из твердого тела в вакуум после нескольких актов рассеяния в приповерхностной области. Данная особенность рассеяния электронов требует минимизации толщины поверхностных слоев твердотельного детектора, в которых не происходит эффективного сбора неосновных носителей заряда. Такими слоями являются пассивирующие слои диэлектриков, слои, обеспечивающие минимизацию поверхностного сопротивления, и приповерхностные области p – n -или изотипных переходов. Характерные толщины таких слоев обычно не более 10 нм [13, 14].

Структура слоев разработанного прибора приведена на рис. 1, а. Эффективная регистрация электронов с энергией около 2 кэВ обеспечивается за счет приповерхностного поля при использовании изотипного p^{++} – p -перехода, сформированного диффузией бора с поверхностной концентрацией примерно 10^{20} см $^{-3}$. Диффузия бора проводилась методом Chemical Vapor Deposition (CVD) при температуре 900 °С. Тянувшее поле, в свою очередь, также формируется в области объемного заряда между p^{++} - и n^{++} -областями. Для создания n^{++} -области проводилась диффузия фосфора при температуре 950 °С.

Профиль примеси бора (рис. 1, б) измерялся методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) (штриховой линией показана область концентраций, недоступная для измерений этим методом). Как видно из рисунка, концентрация бора спадает с поверхности образца в глубину примерно экспоненциально. Глубину диффузии бора можно приблизительно оценить значением 50 нм. Как показали ВИМС-измерения, сформированный диффузией фосфора n^{++} – p -переход располагается на глубине около 1600 нм.

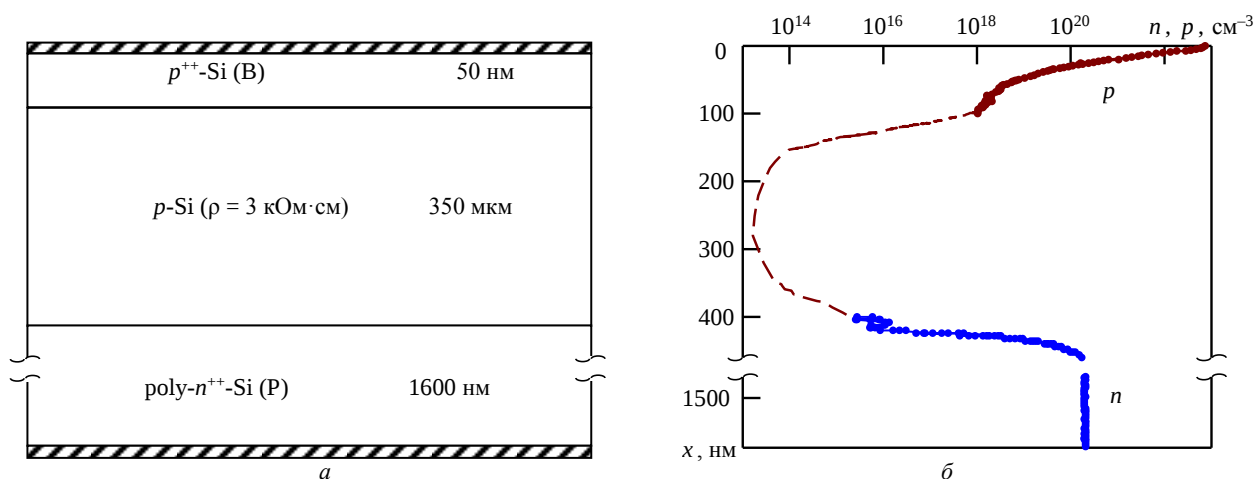


Рис. 1. Кремниевая *pin*-структура: *a* – последовательность слоев; *б* – распределение концентрации примесей
Fig. 1. Silicon *pin*-structure: *a* – layer sequence; *б* – impurity concentration distribution

Изготовленные образцы характеризуются следующими техническими параметрами:

- общее число элементов линейки 12;
- размеры одного элемента линейки 2×0.2 мм;
- размеры чувствительной области 24×0.2 мм.

На рис. 2 представлена конструкция активной области линейки электронно-чувствительных кремниевых диодов (показаны три элемента) и ее поперечный срез. Облучение электронами осуществляется со стороны p^{++} -слоя. Регистрируемые частицы поглощаются в области изотипного p^{++} - p -перехода и высокоомной базы p -типа и движутся к p - n^{++} -переходу в дрейфовом режиме, обеспечиваемом обратным смещением. С целью уменьшения времени сбора электронов из базы можно ввести утонение средней части линейки с исходной толщины пластины кремния (350 мкм) вплоть до 50 мкм. Ширина канавки – 200 мкм. Кроме того, утонение приводит к улучшению частотно-контрастной характеристики фотоприемного устройства. Брать в

качестве исходного кремния полупроводник тоньше 250 мкм нельзя из-за хрупкости пластины.

Со стороны линейки, противоположной облучаемой, на первом этапе наносился слой SiO_2 , затем в изготовленные фотолитографией окна осаждался слой n^{++} -поликремния [10]. Ширина слоя poly-Si также составляет 200 мкм. Далее на поликремнии формировался алюминиевый контакт. Расстояние между элементами определяется расстоянием между соседними окнами в SiO_2 – 60 мкм. Верхний p^{++} -слой сплошной. На него также наносился алюминий с последующим вскрытием окна напротив n^{++} -поликремния. Дно канавки должно быть свободно от алюминия. К верхнему электроду прикладывается отрицательное смещение 200...300 В для создания тянущего поля в i -области диодов.

Далее проанализированы электрофизические свойства кремниевой линейки фотоприемников, облучаемой электронами с обратной стороны.

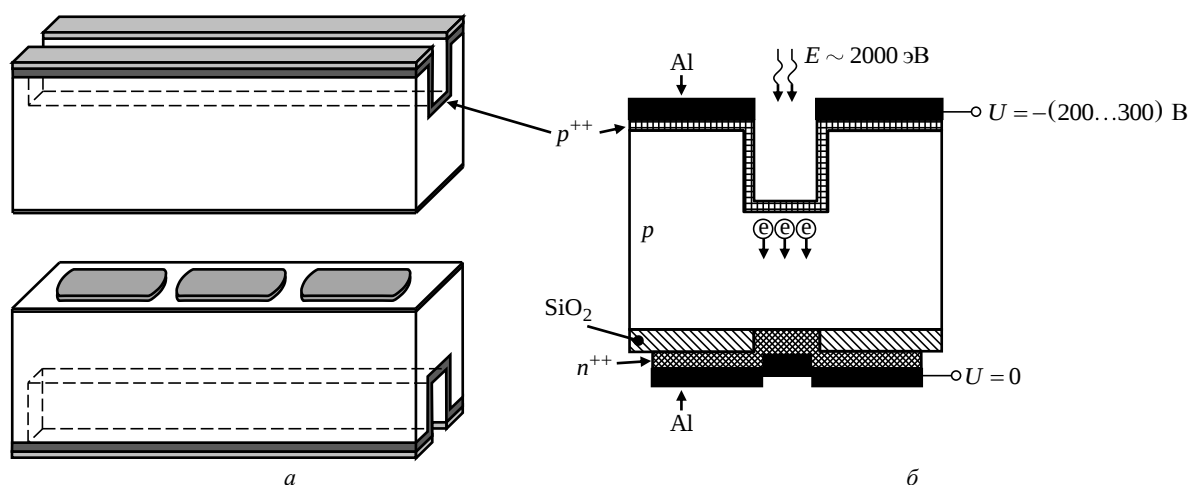


Рис. 2. Активная область линейки: *a* – конструкция; *б* – поперечный срез

Fig. 2. Active area of the strip: *a* – design; *б* – cross section

Расчет характеристик кремниевой линейки *pin*-фотоприемников. Оценим смещение, которое требуется приложить между p^{++} - и n^{++} -областями структуры для полного обеднения i -слоя. В первом приближении для этого воспользуемся выражением для ширины области объемного заряда (ООЗ) резкого p - n -перехода [15]:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(U_{bi} - U)}{eN}}, \quad (1)$$

где $\varepsilon = 11.9$ – относительная диэлектрическая проницаемость кремния; ε_0 – электрическая проницаемость вакуума; U_{bi} – контактная разность потенциалов; U – напряжение смещения; e – заряд электрона; N – концентрация носителей заряда.

Область объемного заряда формируется неподвижными ионами примеси и растет по корневому закону с увеличением приложенного смещения. При пересчете удельного сопротивления в концентрацию носителей заряда использовались справочные данные [15]. Для кремния при 300 К полагаем, что вся примесь ионизована.

Результаты расчета ширины ООЗ в кремнии, применяемом в качестве *pin*-фотоприемника, показали, что слаболегированный кремний с удельным сопротивлением $\rho = 3 \text{ кОм} \cdot \text{см}$ полностью обеднен при напряжении 300 В, а имеющий $\rho = 2 \text{ кОм} \cdot \text{см}$ при таком напряжении обеднен примерно на глубину 245 нм. Подложки n -типа с тем же удельным сопротивлением будут иметь существенно большую ширину ООЗ как следствие меньшей концентрации носителей заряда [15]. При полном обеднении расчетная емкость структуры с указанными параметрами оказывается не более 2 пФ. Такое значение должно обеспечить заданные характеристики прибора по временному разрешению в используемой схеме смещения.

Приведенный оценочный расчет имеет большую погрешность, поскольку ООЗ в полупроводнике не имеет резких границ. Ее край размыт за счет кулоновского экранирования подвижными электронами. Ширина размытия характеризуется дебаевской длиной экранирования [15, 16]:

$$L_D = \left(\frac{\varepsilon\varepsilon_0 kT}{e^2 p} \right)^{1/2},$$

где k – постоянная Больцмана, эВ/К; T – абсолютная температура, К.

В слаболегированном кремнии (с концентрацией $p < 10^{13} \text{ см}^{-3}$) при комнатной температуре L_D будет иметь значение единиц микрометров, т. е. обеднение в реальном приборе наступает гораздо раньше.

С помощью программного пакета одномерного моделирования SimWin [17] выполнен расчет распределения концентрации свободных носителей заряда и потенциала в исследуемой *pin*-структуре при различных значениях приложенного напряжения. Параметры полупроводника, необходимые для расчета (толщины слоев и концентрация внедренной примеси), соответствуют рис. 1. Переход n^{++} - p принят практически резким, а профиль концентрации примеси в p^{++} -слое аппроксимирован экспонентой. Расчет проведен для участка канавки, где толщина всей структуры составляет 150 мкм.

При отсутствии смещения ООЗ в структуре занимает менее 15 мкм. Приложение смещения отрицательной полярности приводит к расширению ООЗ, появлению в ней электрического поля и небольшого обратного тока. При $U = -100 \text{ В}$ ООЗ расширяется практически на всю структуру. Ее граница оказывается локализованной в диапазоне 139...149 мкм (рис. 3). Электрическое поле занимает всю структуру, создавая тянущее поле для носителей заряда; его напряженность изменяется от $1.7 \cdot 10^2$ до $1.3 \cdot 10^4 \text{ В/см}$. Как следует из (1), ширина ООЗ сублинейно возрастает с ростом U , так что для обеднения структуры толщиной 350 мкм необходимо приложить напряжение уже около 300 В.

Рассчитанная в одномерном приближении вольт-амперная характеристика *pin*-диода демонстрировала монотонное возрастание плотности обратного тока до значения 90 мА/см^2 при напряжении -100 В .

Для более полной характеристики линейки *pin*-диодов проводился 3D-расчет структуры в пакете моделирования TCAD Synopsys. В подпрограмме Structure Editor была построена объемная модель линейки (рис. 4). Однако детальные расчеты трехмерной модели потребовали очень больших объемов памяти, не поддерживаемых пакетом. Причиной этого является, с одной стороны, достаточно большой размер структуры, а с другой – наличие чрезвычайно тонких сильнолегированных слоев, для которых требовалась очень подробная сетка. Поэтому далее все вычисления

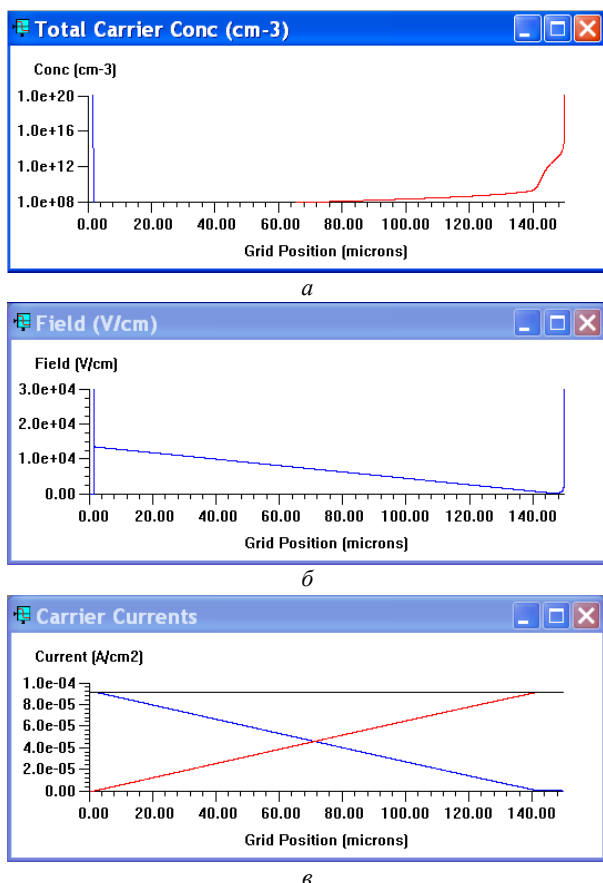


Рис. 3. Результаты моделирования работы p - n перехода при смещении $U = -100$ В: a – концентрация свободных носителей заряда; b – напряженность электрического поля; c – ток в pin -диоде

Fig. 3. The results of modeling the work of the p - n junction at bias $U = -100$ V: a – the concentration of free charge carriers; b – electric field strength; c – current in the pin -diode

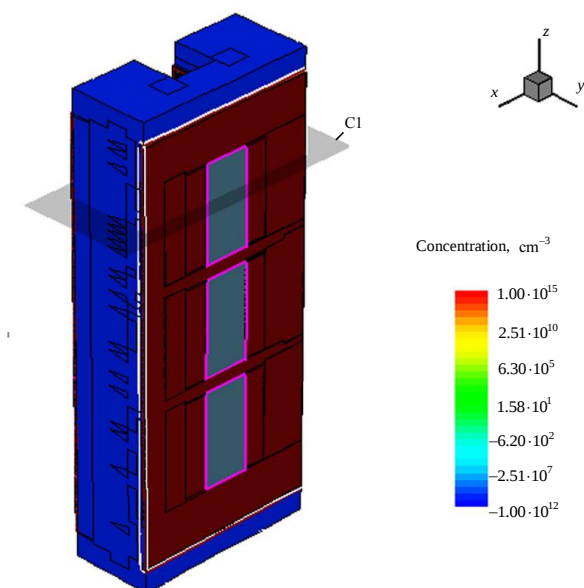


Рис. 4. 3D-модель pin -линейки, построенная в TCAD Synopsys
Fig. 4. 3D-model of the pin -strip created in TCAD Synopsys

выполнялись в квазидвумерном приближении. В структуре делались срезы – поперек структуры и вдоль нее (один из них показан на рис. 4, C1) и формировались две новые 2D-модели. Положение срезов варьировалось.

Поперечное сечение структуры. Распределения потенциала в поперечном сечении структуры при различных глубине канавки d и приложенном напряжении U представлены на рис. 5. Из анализа следует, что на дне неглубокой канавки обеспечивается потенциал, практически равный приложенному к металлическому электроду на поверхности p^{++} -слоя (рис. 5, a , $d = 100$ мкм). Но если канавка достаточно глубокая, то даже p^{++} -слой с концентрацией более 10^{20} см $^{-3}$ не обеспечивает эквипотенциальность и на ее дне оказывается всего лишь половина приложенной к структуре разности потенциалов (рис. 5, b , $d = 200$ мкм). При этом само наличие канавки несущественно модифицирует потенциальный рельеф структуры, создаваемый в первую очередь металлическими контактами. Канавка же как бы "погружается" в имеющееся электрическое поле.

Двумерное распределение области объемного заряда pin -структуры имеет цилиндрическую форму над металлическим контактом, повторяя изопотенциальные кривые рис. 5. В вертикальном сечении потенциал распределен между металлическим контактом и канавкой по квадратичному закону, а напряженность электрического поля – по линейному.

Удельная плотность тока между металлическим контактом и канавкой составляет примерно 4 мА/см 2 .

Продольное сечение структуры. Проведен расчет напряженности электрического поля и распределения зарядов в продольной геометрии структуры. Предметом анализа явилось распределение электрического поля в полупроводнике между металлическими контактами и его зависимость от расстояния между контактами. Кроме того, исследовалось влияние этого расстояния на смыкание ООЗ соседних диодов.

Геометрия и параметры легирования структуры приняты соответствующими рис. 5, b : глубина канавки $d = 200$ мкм, расстояние между металлическими контактами 60 мкм. Напряжение смещения составило 130 В (нулевой потенциал располагался на металлическом контакте). На рис. 6, a изображено распределение потенциала под канавкой, в целом равномерное на подавляющей

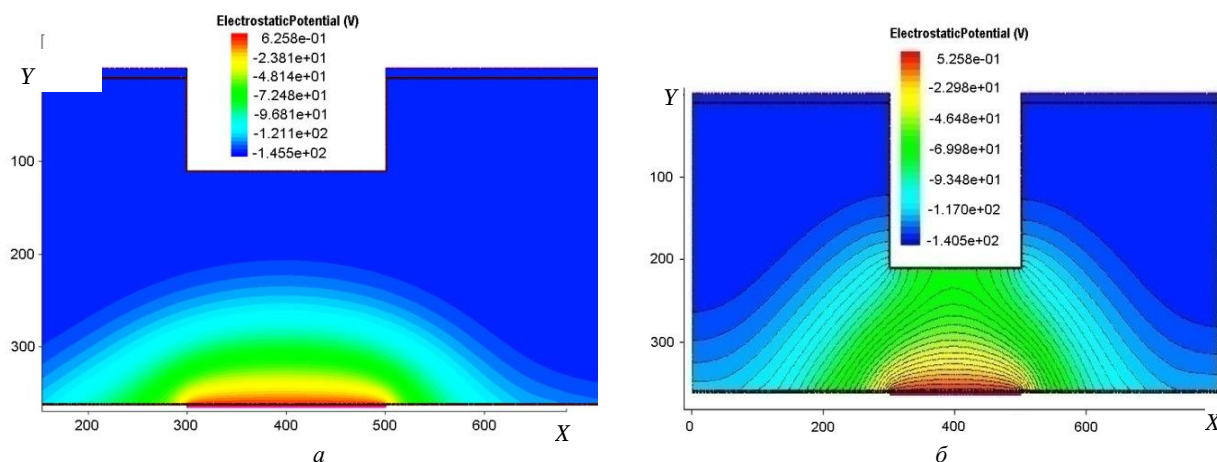


Рис. 5. Распределение электростатического потенциала в области объемного заряда:

$a - U = 145 \text{ В}, d = 100 \text{ мкм}; б - U = 140 \text{ В}, d = 200 \text{ мкм}$

Fig. 5. Distribution of electrostatic potential in the space charge region:

$a - U = 145 \text{ V}, d = 100 \text{ μm}; б - U = 140 \text{ V}, d = 200 \text{ μm}$

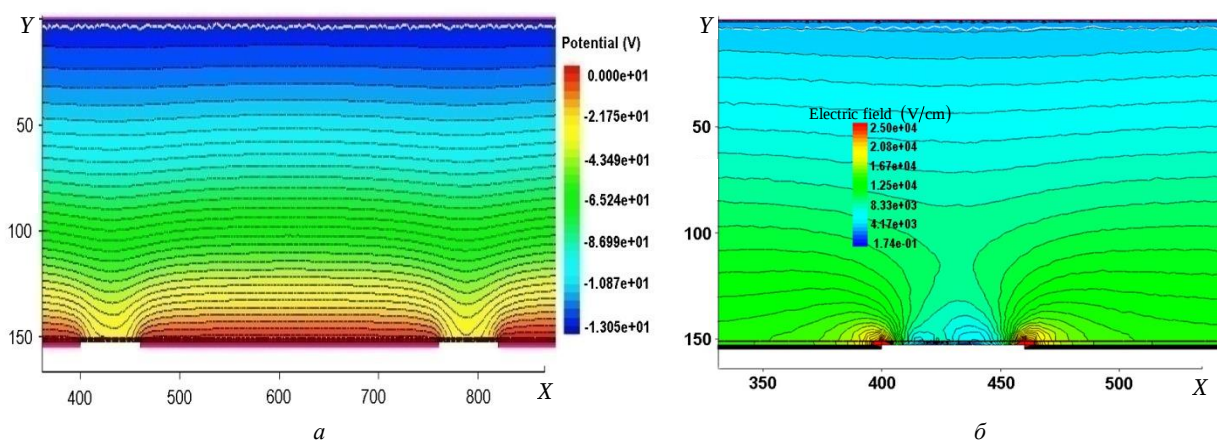


Рис. 6. Распределение электростатического потенциала (а) и напряженности электрического поля (б)

в структуре с $d = 150 \text{ мкм}$ при $U = 130 \text{ В}$

Fig. 6. Distribution of electrostatic potential (a) and electric field strength (b) in the structure with $d = 100 \text{ μm}$ at $U = 130 \text{ V}$

части глубины структуры. Неравномерность оказывается существенной на последних 20 мкм. Как видно из графика, посередине между контактами существует потенциал порядка -30 В .

Напряженность электрического поля по вертикали структуры иллюстрируется рис. 6, б. Как и следовало ожидать, максимальный отход от равномерного распределения напряженности электрического поля наблюдается на краях контактов, где она достигает $2.5 \cdot 10^4 \text{ В/см}$ при указанном значении приложенного напряжения. При этом в незакрытом контактом участке поверхности напряженность поля в 5 раз меньше.

Распределение полной удельной плотности тока в структуре при обратном напряжении 130 В приведено на рис. 7. В области, закрытой контактами, плотность тока равномерна и примерно равна 20 мА/см^2 . В центре ток оказывается на

порядок меньше, уходя к краям металлических контактов. Были рассчитаны вольт-амперные характеристики для нескольких металлических контактов с размерами $0.3 \times 0.2 \text{ мкм}$.

Сравнивалось распределение потенциала по структуре при варьировании расстояния между металлическими контактами от 40 до 80 мкм. При изменении в указанных пределах потенциал в центре между ними изменяется от -20 до -40 В , а напряженность электрического поля падает незначительно – с $5 \cdot 10^3$ до $4 \cdot 10^3 \text{ В/см}$. Увеличение ширины межконтактного зазора до 80 мкм приводит к существенному перераспределению плотности тока от его центра к металлическим контактам. В области межконтактного зазора плотность тока оказывается меньше по всей толщине структуры, что следует считать неоптимальным.

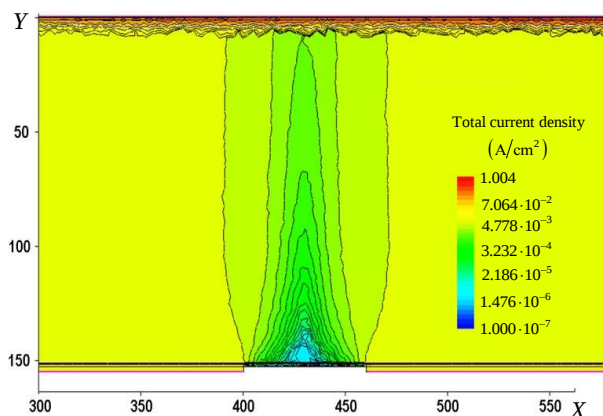
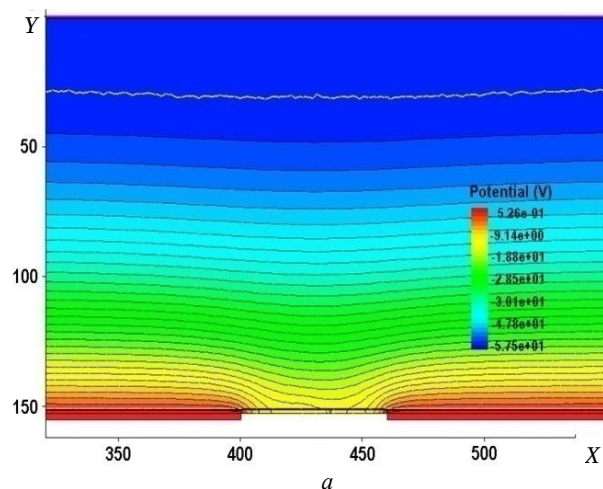


Рис. 7. Распределение полной удельной плотности тока в структуре под канавкой шириной 60 мкм при $U = 130$ В, $d = 200$ мкм

Fig. 7. Distribution of the total current density in the structure under a groove wide 60 μm at $U = 130$ V, $d = 200$ μm

Следует иметь в виду, что на дне глубокой канавки оказывается всего лишь часть (в случае $d = 200$ мкм – половина) приложенной к структуре (между металлическими контактами сверху и снизу) разности потенциалов (рис. 5, б). Учтем это обстоятельство, подав ко дну канавки соответствующий уменьшенный потенциал (рис. 8, а). Главный результат – ширина ООЗ не перекрывает все 150 мкм. Около 25 мкм под канавкой остаются в области электронейтральности (граница ООЗ показана белой линией). В данном случае расстояние между нижними металлическими контактами слабо влияет на ширину ООЗ. Ее некоторое "провисание" в случае большого зазора (80 мкм) следует считать незначительным.



Распределение плотности тока в области канавки при учете пониженного потенциала на ее дне относительно приложенного к металлическому контакту (рис. 8, б) в целом идентично ранее приведенным графикам (рис. 7), отличаясь несколько меньшими значениями. Между нижними металлическими контактами наблюдается снижение плотности тока.

Для разрабатываемого скоростного датчика перемещения важным параметром является скорость отклика отдельного диода. Она определяется временем дрейфового пролета электрона через структуру и прямо пропорциональна длине пролета L : $t = L/v$, где $v = \mu E$ – скорость дрейфа ($E = U/d$ – напряженность электрического поля). Подвижность электронов в кремнии μ по различным справочным данным составляет 0.14...0.19 $\text{m}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Тогда при смещении $U = 300$ В время на пролет структуры толщиной $d = 350$ мкм составит около 2.7 нс, а при толщине 150 мкм – в 2 раза меньше.

Тестирование гибридного ИК-прибора на базе *pin*-линейки. После изготовления партии диодных линеек без канавок образцы проходили тестирование в составе гибридного фотодетектора: определялось время нарастания импульсной характеристики (длительность фронта) в соответствии с ГОСТ 11612.13–85. В этих измерениях фотокатод прибора облучался световыми импульсами от светодиода с длиной волны излучения 1310 нм, который располагался на расстоянии 1 см от входного окна прибора. Светодиод питался от генератора

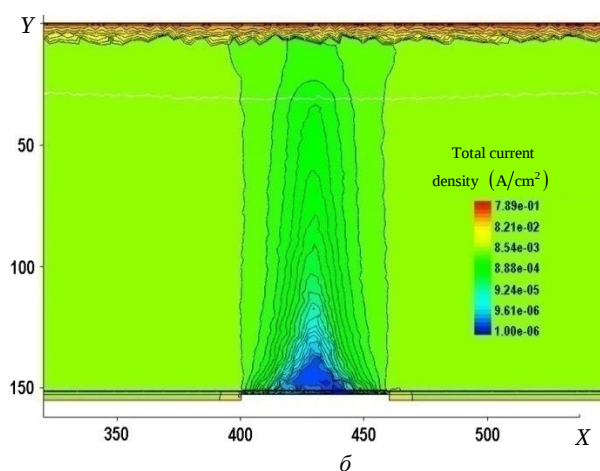


Рис. 8. Распределение потенциала по структуре (а) и плотность тока в области канавки (б) при приложенном ко дну канавки напряжении 57 В. Глубина канавки $d = 200$ мкм, расстояние между металлическими контактами 60 мкм

Fig. 8. The potential distribution by structure (a) and current density in the groove region (б) with a voltage applied to the bottom of the groove 57 V. The depth of the groove is $d = 200$ μm , the distance between the metal contacts is 60 μm

Г5-56 импульсами напряжения отрицательной полярности амплитудой 3 В. Частота следования световых импульсов составляла 2 Гц, длительность импульса генератора 10 нс, фронт и спад импульса по 5 нс. Через балластное сопротивление $R_6 = 25$ ГОм на фотокатод подавалось высокое напряжение $U_{фк} = -2.6$ кВ относительно линейки диодов.

В эксперименте рабочая поверхность фотокатода напротив диодов линейки ограничивалась диафрагмой с размерами 2×25 мм, установленной непосредственно на входном окне. При исследовании сигнала каждого диода остальные диоды линейки заземлялись. Расстояние между элементами составляло 60 мкм. На общий электрод линейки от источника постоянного тока подавалось напряжение отрицательной полярности U_d , постоянный темновой ток в цепи I_d контролировался микроамперметром. Режим питания для всех диодов составлял $U_d = -270$ В, при этом, как показал анализ, вся структура была обеднена. Это значение напряжения смещения оказалось несколько ниже расчетного для данной толщины активной области фотоприемника. Причиной является обсуждавшееся ранее дебаевское размытие края области объемного заряда, а также наличие диффузионных "хвостов" от сильнолегированных слоев, эффективно уменьшающих толщину ООЗ.

Осциллограмма отклика одного из диодов на импульсный сигнал ИК-светодиода представлена на рис. 9. Сигнал показан после вычитания помех; полоса частот 150 МГц, нагрузка 50 Ом. Как видно, фронт регистрируемого сигнала около 5 нс. В целом по результатам исследований при $U_d = -270$ В на всех каналах прибора достигнута требуемая длительность фронта сигнала (5...9 нс).

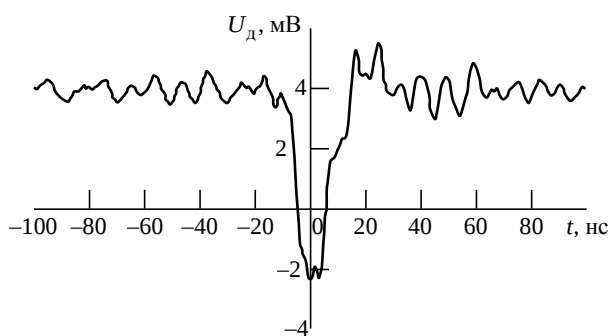


Рис. 9. Осциллограмма импульсной характеристики одного *pin*-диода линейки

Fig. 9. Oscillogram of the impulse response of one *pin*-diode of the strip

Этот результат демонстрирует, что на первом этапе разработки можно не применять утонение центральной части фотоприемника, чтобы не усложнять технологию изготовления прибора. Тем не менее отработка комплекса технологических операций по прецизионному утонению фоточувствительной области приемника ИК-излучения с учетом приведенных расчетов в дальнейшем даст возможность существенно (до 3 раз) снизить прикладываемое рабочее смещение и в 3 раза увеличить быстродействие фотоприемной линейки.

Заключение. Для гибридного фотодетектора ИК-излучения, чувствительного в спектральном диапазоне 1...1.6 мкм, разработана линейка из 12 кремниевых *pin*-диодов с удельным сопротивлением базы кристалла 3 кОм · см. Сильнолегированные наноразмерные p^{++} - и n^{++} -слои сформированы диффузией бора и фосфора. Размеры чувствительной области элемента линейки 24×0.2 мм. В области объемного заряда структуры формируется тянущее поле за счет приложенного обратного напряжения.

Проведен 2D-расчет распределения концентрации свободных носителей заряда и потенциала в *pin*-структуре. Определены минимальные напряжения, обеспечивающие полное обеднение i -слоя, в том числе для случая дополнительно сформированной продольной канавки различной глубины. Показано, что при варьировании расстояния между металлическими контактами от 40 до 80 мкм потенциал в центре между ними изменяется от -20 до -40 В, а напряженность электрического поля незначительно падает.

Изготовленная линейка тестировалась в составе готового гибридного фотоэлектронного прибора облучением световыми импульсами длительностью 10 нс от ИК-светодиода с длиной волны 1310 нм. Вылетающие с ИК-фотокатода фотоэлектроны ускорялись за счет подачи на него высокого напряжения 2.6 кВ относительно линейки *pin*-диодов и детектировались отдельными диодами линейки. В процессе испытаний прибор выдержал напряжение до $U_{фк} = -3.5$ кВ, диоды способны выдерживать ток в импульсе 150 мкА и более. Результаты исследований фронта импульсной характеристики показывают, что без операции утонения при напряжении на диоде -270 В была достигнута длительность фронта сигнала на всех каналах 5...9 нс, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к быстродействующему позиционно-чувствительному датчику ИК-излучения.

Авторский вклад

Айнбунд М. Р. – введение в проблему; постановка задачи; обсуждение результатов.

Миронов Д. Е. – проведение расчетов в программе SimWin; результаты измерения частотных свойств фоточувствительной линейки.

Пашук А. В. – обзор существующих публикаций в предметной области; результаты измерения фоточувствительности в ИК-области.

Зубков В. И. – проведение расчетов в программе TCAD; моделирование распределения концентрации носителей заряда.

Соломонов А. В. – физическая модель электронно-чувствительной линейки; анализ результатов.

Забродский В. В. – измерения профилей концентрации примесей в *pin*-линейке; характеристики оксидных слоев.

Николаев А. В. – формирование сильнолегированных p^{++} - и n^{++} -слоев методом диффузии; отладка и описание технологических режимов.

Authors' Contribution

Mikhail R. Ainbund, introduction to the problem; formulation of the problem; discussion of the results.

Denis E. Mironov, calculations in the SimWin program; results of measuring the frequency properties of the photosensitive strip.

Andrey V. Pashuk, a review of existing publications in the subject area; infrared photosensitivity measurement results.

Vasily I. Zubkov, calculations in the TCAD program; simulation of the distribution of the concentration of charge carriers.

Alexander V. Solomonov, physical model of the electron sensitive line strip; analysis of the results.

Vladimir V. Zabrodskii, measurement of impurity concentration profiles in the *pin*-strip; characteristics of oxide layers.

Andrey V. Nikolaev, the formation of heavily doped p^{++} - and n^{++} -layers by diffusion; optimization and description of technological regimes.

Список литературы

1. Silicon infrared focal plane arrays / M. Kimata, H. Yagi, M. Ueno, J. Nakanishi, T. Ishikawa, Y. Nakaki, M. Kawai, K. Endo, Y. Kosasayama, Y. Ohota, T. Sugino, T. Sone / ed. by G. J. Brown, M. Razeghi // Photodetectors: Materials and Devices VI. Proc. of SPIE. 2001. Vol. 4288. P. 286–297. doi: 10.1117/12.429416

2. Пономаренко В. П. Квантовая фотосенсорика. М.: АО "НПО Орион", 2018. 648 с.

3. Rogalski A. Progress in focal plane array technologies (Review) // Progress in Quantum Electronics. 2012. Vol. 36, iss. 2–3. P. 342–473. doi: 10.1016/j.pquantelec.2012.07.001

4. Burke B., Jorden P., Vu P. CCD technology // Experimental Astronomy. 2005. Vol. 19, iss. 1–3. P. 69–102. doi: 10.1007/s10686-005-9011-4

5. Гибридные высокочувствительные цифровые телевизионные приборы для УФ и ИК спектральных диапазонов / М. Р. Айнбунд, А. В. Гарбуз, А. А. Дементьев, Е. Е. Левина, Д. Е. Миронов, А. В. Пашук, К. Я. Смирнов, О. В. Чернова // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6, № 6. С. 514–517.

6. Высокочувствительный гибридный фотоприемный модуль на основе фотокатодов с отрицательным электронным сродством и матриц ПЗС (КМОП) с электронной бомбардировкой тыльной стороны /

Л. М. Баясный, А. Б. Балашов, Ю. Н. Гордиенко, Ю. К. Грузевич, Д. Е. Миронов, А. Э. Петров, С. С. Таурецких // Прикладная физика. 2018. № 4. С. 74–78.

7. Айнбунд М. Р., Миронов Д. Е., Зубков В. И. Гибридные фотоэлектронные приборы (Обзор) // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6, № 5. С. 401–407.

8. Бегучев В. П., Чапкевич А. Л., Филачев А. М. Электронно-оптические преобразователи. Состояние и тенденции развития // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 132–140.

9. Физические основы полупроводниковой фотоэлектроники / А. В. Войцеховский, И. И. Ижнин, В. П. Савчин, Н. М. Вакив. Томск: Издательский дом ТГУ, 2013. 560 с.

10. Гибридный многоканальный фотоприемник для спектрального диапазона 1–1.6 мкм / М. Р. Айнбунд, Д. Л. Глебов, В. В. Забродский, Е. Е. Левина, Д. Е. Миронов, А. В. Николаев, А. В. Пашук, К. Я. Смирнов, В. М. Фролов // Прикладная физика. 2018. № 6. С. 54–59.

11. Hanoka J. I., Bell R. O. Electron-beam-induced currents in semiconductors // Ann. Rev. Mater. Sci. 1981. Vol. 11. P. 353–380. doi: 10.1146/annurev.ms.11.080181.002033

12. Беспалов В. И. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 368 с.

13. Fundamental limits to detection of low-energy ions using silicon solid-state detectors / H. O. Funsten, S. M. Ritzau, R. W. Harper, R. Korde // App. Phys. Lett. 2004. Vol. 84, № 18. P. 3552–3554. doi: 10.1063/1.1719272

14. Характеризация полупроводниковых детекторов монокинетических и отраженных электронов с энергией 1–30 кэВ / А. В. Гостев, С. А. Дицман, В. В. Забродский, Н. В. Забродская, Ф. А. Лукьянов, Э. И. Рау, Р. А. Сеннов, В. Л. Суханов // Изв. РАН. Сер. Физическая. 2008. Т. 72, № 11. С. 1539–1544.

15. Sze S. M., Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 832 p. doi:10.1002/0470068329

16. Зубков В. И. Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса. СПб., М.: ООО "Техномедиа" / Элмор, 2007. 220 с.

17. Winston D. Physical simulation of optoelectronic semiconductor devices. Boulder: University of Colorado, 1996. 186 p.

Информация об авторах

Айнбунд Михаил Рувимович – кандидат технических наук (1974), начальник отдела АО «ЦНИИ "Электрон"». Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – фотоэлектроника, физика твердого тела, гибридные фотоприемные устройства, твердотельные матричные фотоприемные устройства. Адрес: АО «ЦНИИ "Электрон"», пр. Тореза, д. 68, лит. Р, Санкт-Петербург, 194223, Россия
E-mail: m.ainbund@mail.ru

Миронов Денис Евгеньевич – инженер по специальности "Радиотехника" (1999), Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ведущий научный сотрудник АО «ЦНИИ "Электрон"». Автор 11 научных работ. Сфера научных интересов – фотоэлектроника, радиотехника, гибридные фотоприемные устройства, твердотельные матричные фотоприемные устройства. Адрес: АО «ЦНИИ "Электрон"», пр. Тореза, д. 68, лит. Р, Санкт-Петербург, 194223, Россия
E-mail: 918@mail.ru

Пашук Андрей Владимирович – окончил Ленинградский государственный университет им. А. А. Жданова (1984), начальник лаборатории АО «ЦНИИ "Электрон"». Автор 28 научных работ. Сфера научных интересов – фотоэлектроника, гибридные фотоприемные устройства, инфракрасная техника, твердотельные матричные фотоприемные устройства. Адрес: АО «ЦНИИ "Электрон"», пр. Тореза, д. 68, лит. Р, Санкт-Петербург, 194223, Россия
E-mail: perspectiva-good@mail.ru

Зубков Василий Иванович – доктор физико-математических наук (2008), профессор (2018) кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 170 научных работ. Сфера научных интересов – физика твердого тела и физика полупроводников, нанoeлектроника, моделирование и диагностика квантово-размерных гетероструктур. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: vzubkovspb@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6830-6899>

Соломонов Александр Васильевич – доктор физико-математических наук (2000), профессор (2002), декан факультета электроники, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 140 научных работ. Сфера научных интересов – микроэлектроника и оптика полупроводников, нанoeлектроника, квантово-размерные гетероструктуры. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: alexander.v.solomonov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6721-4159>

Забродский Владимир Викторович – инженер по специальности "Микроэлектроника" (2001), Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), научный сотрудник ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН. Автор 32 научных работ. Сфера научных интересов – фотоэлектроника, кремниевые фотодиоды, технология полупроводниковых приборов. Адрес: Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, Политехническая ул., д. 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия
E-mail: slidet@mail.ioffe.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8065-6517>

Николаев Андрей Валерьевич – кандидат химических наук (2013), научный сотрудник ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН. Автор 9 научных работ. Сфера научных интересов – фотоэлектроника, кремниевые фотодиоды, технология полупроводниковых приборов.
Адрес: Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, Политехническая ул., д. 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия
E-mail: a.v.nikolaev@mail.ioffe.ru

References

1. Kimata M., Yagi H., Ueno M., Nakanishi J., Ishikawa T., Nakaki Y., Kawai M., Endo K., Kosasayama Y., Ohota Y., Sugino T., Sone T. Silicon Infrared Focal Plane Arrays. Photodetectors: Materials and Devices VI, ed. by G. J. Brown, M. Razeghi. Proc. of SPIE. 2001, vol. 4288, pp. 286–297. doi: 10.1117/12.429416
2. Ponomarenko V. P. *Kvantovaya fotosensorika* [Quantum Photosensory]. Moscow, JSC "NPO Orion", 2018, 648 p. (In Russ.)
3. Rogalski A. Progress in Focal Plane Array Technologies (Review). Progress in Quantum Electronics. 2012, vol. 36, iss. 2–3, pp. 342–473. doi: 10.1016/j.pquantelec.2012.07.001
4. Burke B., Jorden P., Vu P. CCD technology. Experimental Astronomy. 2005, vol. 19, iss. 1–3, pp. 69–102. doi: 10.1007/s10686-005-9011-4
5. Ainbund M. R., Garbuz A. V., Dement'ev A. A., Levina E. E., Mironov D. E., Pashuk A. V., Smirnov K. Ya., Chernova O. V. Hybrid High Sensitive Digital TV Devices for UV and IR Spectral Ranges. Advances in Applied Physics. 2018, vol. 6, no. 6, pp. 514–517. (In Russ.)
6. Balyasnyi L. M., Balashov A. B., Gordienko Yu. N., Gruzevich Yu. K., Mironov D. E., Petrov A. E., Tataurshchikov S. S. High-Sensitivity Hybrid Device Based on Photocathodes with Negative Electronic Affinity and CCD (CMOS) Matrixes with Electron Bombardment its Back Side. Applied Physics. 2018, no. 4, pp. 74–78. (In Russ.)
7. Ainbund M. R., Mironov D. E., Zubkov V. I. Hybrid Photoelectric Devices (a review). Advances in Applied Physics. 2018, vol. 6, no. 5, pp. 401–407. (In Russ.)
8. Beguchev V. P., Chapkevich A. L., Filachev A. M. Image Intensifiers Today. State and Basic Development Tendencies. Applied Physics. 1999, no. 2, pp. 132–140. (In Russ.)
9. Voitsekhovskii A. V., Izhnin I. I., Savchin V. P., Vakiv N. M. *Fizicheskie osnovy poluprovodnikovoi fotoelektroniki* [Physical Fundamentals of Semiconductor Photoelectronics]. Tomsk, *Izd. dom TGU*, 2013, 560 p. (In Russ.)
10. Ainbund M. R., Glebov D. L., Zabrodskii V. V., Levina E. E., Mironov D. E., Nikolaev A. V., Pashuk A. V., Smirnov K. Ya., Frolov V. M. Hybrid Multi-Channel Photodetector for 1–1.6 μm Spectral Range Applied Physics. 2018, no. 6, pp. 54–59. (In Russ.)
11. Hanoka J. I., Bell R. O. Electron-Beam-Induced Currents in Semiconductors. Ann. Rev. Mater. Sci., 1981, vol. 11, pp. 353–380. doi: 10.1146/annurev.ms.11.080181.002033
12. Bepalov V. I. *Vzaimodeistvie ioniziruyushchikh izluchenii s veshchestvom* [The Interaction of Ionizing Radiation with Matter]. Tomsk, *Izd-vo TPU*, 2007, 368 p. (In Russ.)
13. Funsten H. O., Ritzau S. M., Harper R. W., Korde R. Fundamental Limits to Detection of Low-Energy Ions Using Silicon Solid-State Detectors. App. Phys. Lett. 2004, vol. 84, no. 18, pp. 3552–3554. doi: 10.1063/1.1719272.
14. Gostev A. V., Ditsman S. A., Zabrodskaya N. V., Luk'yanov F. A., Rau E. I., Sennov R. A., Sukhanov V. L. Characterization of Semiconductor Detectors of Monokinetic and Reflected Electrons with an Energy of 1–30 keV. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2008, vol. 72, no. 11, pp. 1539–1544. (In Russ.)
15. Sze S. M., Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. New Jersey, John Wiley & Sons, 2006, 832 p. doi:10.1002/0470068329
16. Zubkov V. I. Diagnostika poluprovodnikovyykh nanogeterostruktur metodami spektroskopii admittansa [Diagnostics of Semiconductor Nanoheterostructures by Admittance Spectroscopy]. Moscow, Elmor, 2007, 220 p. (In Russ.)
17. Winston D. Physical Simulation of Optoelectronic Semiconductor Devices. Boulder, University of Colorado, 1996. 186 p.

Information about the Authors

Mikhail R. Ainbund, Cand. Sci. (Eng.) (1974), Head of Department JSC «NRI «Electron». The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: photoelectronics, solid state physics, hybrid photoelectric devices, solid state matrix photoelectric devices.
Address: JSC "NRI "Electron", 68 Toreza Ave., St Petersburg 194223, Russia
E-mail: m.ainbund@mail.ru

Denis Ye. Mironov, Engineer on Radio engineering (1999, St Petersburg State University of Telecommunications), Leading Researcher of JSC «NRI «Electron». The author of 11 scientific publications. Area of expertise: photoelectronics, radio engineering, hybrid photoelectric devices, solid state matrix photoelectric devices.
Address: JSC NRI Electron, 68 Toreza Ave., St Petersburg 194223, Russia
E-mail: 918@mail.ru

Andrey V. Pashuk, Head of Laboratory JSC «NRI «Electron». The author of 28 scientific publications. Area of expertise: photoelectronics, hybrid photoelectric devices, IR-technique, solid state matrix photoelectric devices.
Address: JSC "NRI "Electron", 68 Toreza Ave., St Petersburg 194223, Russia
E-mail: perspectiva-good@mail.ru

Vasily I. Zubkov, Dr. Sci. (Phys.) (2008), Professor (2018) of Department of Micro- and Nanoelectronics Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 170 scientific publications. Area of expertise: solid state physics and physics of semiconductors, nanoelectronics, simulation and diagnostics of quantum-sized structures.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov Str., St Petersburg 197376, Russia
E-mail: vzubkovspb@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6830-6899>

Alexander V. Solomonov, Dr. Sci. (Phys.) (2000), Professor (2002), Dean of Faculty of Electronics, Professor of Department of Micro- and Nanoelectronics Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 140 scientific publications. Area of expertise: microelectronics and optics of semiconductors, nanoelectronics, quantum-sized heterostructures.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov Str., St Petersburg 197376, Russia
E-mail: alexander.v.solomonov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6721-4159>

Vladimir V. Zabrodskii, Engineer on Microelectronics (2001), Saint Petersburg Electrotechnical University, Research Fellow of Ioffe Institute. The author of 32 scientific publications. Area of expertise: photoelectronics, silicon photodiodes, technology of semiconductor diodes.
Address: Ioffe Institute, 26 Politekhnikeskaya Str., St Petersburg 194021, Russia
E-mail: slidet@mail.ioffe.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8065-6517>

Andrey V. Nikolaev, Cand. Sci. (Chem.) (2013), Research Fellow of Ioffe Institute. The author of 9 scientific publications. Area of expertise: photoelectronics, silicon photodiodes, technology of semiconductor diodes.
Address: Ioffe Institute, 26 Politekhnikeskaya Str., St Petersburg 194021, Russia
E-mail: a.v.nikolaev@mail.ioffe.ru

From Gas Sensors to Detection of Etanol Vapour to Sensor of Bacteria Detection

Dimitre Tz. Dimitrov✉

Sofia University St. Kliment Ohridski, Sofia, Bulgaria

✉ nhddt@chem.uni-sofia.bg, dimitrov2001@yahoo.com

Abstract

Introduction. Metal oxide semiconductor sensors have many advantages. But their working temperature is still high and their sensitivities are frequently low. In the current work, I present the results from investigation of sensing ability of new kind of potentiometric solid state gas sensor.

Aim. The main goal of this work is investigation of the temperature dependence in the flow of air and in ethanol vapour mixture of the investigated junction structures. Also, we investigated at fixed temperature the dependence of the thermoelectric force from the ethanol vapour concentration at possible low operation temperature. For the structure, which shows the lowest operation temperature to ethanol vapour, we investigate the ability to detect *Pseudomonas putida* suspension.

Materials and methods. In this work, the sensitivity to ethanol vapour and *Pseudomonas putida* suspension were investigated by measuring the thermoelectric force (the voltage) appearing of the structures by standart voltmeters.

Results. Two experimental installations for sensors have been developed. The first one is for detection of ethanol vapour by ZnO/ZnO:Cu, ZnO/ZnO:CuO, ZnO/ZnO:Fe junction structures. The second installation was for *Pseudomonas putida* suspension detection in gas phase by ZnO/ZnO:Fe junction structure. We discovered that ZnO/ZnO:Fe structure, has the lowest operation temperature of 200 °C to ethanol vapour. For this structure, the potential difference has a negative value and decreases with increasing the amount of the pulverized bacteria.

Conclusion. We discovered that ZnO/ZnO:Fe structure, has the lowest operation temperature of 200 °C. This operation temperature is a bit higher than operation temperature of at which some very novel sensing structures shows the maximum sensitivity.

Key words: Nanostructured ZnO thin films, Ga and Cu doped ZnO thin films, CuO doped ZnO nanowires, Fe doped ZnO thin films, Ethanol gas sensor and Bacteria detection

For citation: Dimitrov D. Tz. From Gas Sensors to Detection of Etanol Vapour to Sensor of Bacteria Detection. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 5, pp. 93–106. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-93-106

Conflict of interest. I declare that this work has no conflict of interest.

Submitted 19.09.2019; accepted 21.10.2019; published online 29.11.2019

Introduction. The basic principle of operation of the solid state ethanol sensors are the changes of the electrical properties of ZnO layer under adsorption of ethanol molecules on the ZnO surface. The interaction of ethanol molecules with ZnO surface is investigated and understood quite well [1, 2]. Taking into account very poor selectivity of ZnO gas sensors, the molecules of ethanol gas could be used as a probe for checking sensing properties of the ZnO gas sensors.

Different science groups have fabricated solid-state ethanol sensors in the form of sensing film, formed on alumina ceramic tube, different nanostructures on flat solid surfaces, different forms of chemo-

resistors, formed by pressing, powder of ZnO nanoparticles used for generated cataluminescence emission from catalytic ethanol oxidation on the surface.

The normal operation temperature of metal oxide gas sensors is in general within the range between 200 and 500 °C, where conduction is electronic and oxygen vacancies are doubly ionized. ZnO thin films, one of the earliest discovered material for gas sensing has been widely used to detect low-concentration of gases, have drawbacks, for instance, the working temperature is within the above range and their sensitivities are frequently low [3].

Real-time detection of toxic gases by analytical

equipments such as Fourier transform infrared spectroscopy, Gas chromatography, or mass spectrometers is expensive and not practical mainly due to the bulky size of the instruments. Metal oxide semiconductor sensors have advantages of small size, low mass and cost, good sensitivity at the ambient conditions, easy processing and simplicity in fabrication [4, 5].

In the current work, I present the results from investigation of sensing ability of new kind of potentiometric solid state gas sensors, which are having nonlinear response towards the ethanol vapour concentration. In this work:

1. The sensing structures were constructed by overlapping of pure ZnO and doped with Cu or Ga nanostructured ZnO layers and their sensing properties investigated in the temperature range from 240 to 350 °C. By using thus constructed by us apparatus, presented in detail here, we investigated first the temperature dependence in the flow of air and in ethanol vapour mixture. Second, we investigated at fixed temperature the dependence of the thermoelectric force (the potential difference) appearing on the junctions from the ethanol vapour concentration [6].

2. Described the synthesis of ZnO/ZnO:CuO structures in the form of overlapping layers of nanowires of pure and copper oxide doped zinc oxide. The obtained structures were tested as a sensor to the vapour of ethanol. Interaction of the obtained sensor structures with vapour of ethanol is investigated by measuring the potential difference between the layers of pure and CuO modified ZnO nanowires in the temperature range from 190 to 300 °C [7].

3. Investigate the nanostructured layers ZnO/ZnO:Fe junctions, obtained by the sol-gel technology. The best sensing performance was obtained for the structure with upper layer produced by two dip-coatings in the sol containing 3 at. % of Fe into it in the temperature range from 180 to 360 °C [8].

Taking into account that ZnO/ZnO:Fe junction structures has significant sensitivity to ethanol vapour at lowest operation temperature and that during sensing of ethanol, there is a chemical interaction between oxygen of ethanol and zinc of ZnO:Fe thin film [9] and the fact that leaching of Zn ions has a minor influence on the antibacterial activity [10], we concluded that ZnO/ZnO:Fe junction structures can be used for detection of bacteria. We use an experimental investigation of the sensing properties towards *Pseudomonas putida* suspension of the ZnO/ZnO:Fe junctions. The sensing properties of these structures towards *Pseudomonas putida* suspension are

investigated in a newly constructed experimental set-up for bacterial detection [11, 12]. Observed properties depend on the relation of the concentration of charge carriers into the top and the bottom layers of the sensing junction and the nature of analyte.

Materials and methods. The main purpose of this work is to check the sensing to traces of ethanol vapour of different junction structures (ZnO/ZnO:Cu,Ga, ZnO/ZnO:CuO, ZnO/ZnO:Fe). After that the ZnO/ZnO:Fe structures, which shows the best sensitivity at ethanol vapour at lowest operation temperature were tested in detection *Pseudomonas putida* suspension.

1. *Preparation of ZnO/ZnO:Cu,Ga structures* [6]. For preparation of ZnO doped with Cu and Ga sol we have used the following precursors: $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and 2-methoxyethanol, both from Fluka, monoethanolamine from Riedel-de-Haen, $\text{Cu}_2(\text{OAc})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ from Sigma and Ga(III) chloride from Aldrich. Three different sols with concentration of Cu and Ga as 1, 3 and 5 at. % into it were prepared. The nanostructured layers were deposited on alumina ceramic substrate (Rubalit®710) with size $20 \times 10 \times 0.63$ mm from CeramTec AG. The precursors were mixed together in a round bottom triple neck flask, stirred by magnetic stirrer for 15 min at room temperature and heated to 60 °C while stirring for 1 h. The produced by the above way sol was aged for 24 h. The process of producing the structures including pure and doped with Cu and Ga ZnO films consist of two stages, each including of few steps. The first stage is preparation of thin film of ZnO if we want the ZnO layer to be lower layer of the structure and the second is preparing the doped layer by earlier prepared solutions with different content of Cu and Ga, when we want the doped layer to be on the top of the structure. The process of producing pure ZnO thin films consists of the following steps:

- a) deposition of the sol on ceramic substrate Rubalit®710 by means of dip-coating method;

- b) different numbers of dip-coating cycles of the substrate into the sol until obtaining the desirable thickness of the films;

- c) drying and annealing of the films.

After each dipping procedure the films were drying at 80 °C for 30 min and then dipped again into the sol until the desirable thickness was obtained. The final calcination of a film is carried out at 500 °C for 60 min, followed by cooling down in the air at the room temperature. ZnO films doped with Cu or Ga were prepared by the same procedure, us-

ing different amounts (1, 3 or 5 at. %) of the dopants: $\text{Cu}_2(\text{OAc})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (Sigma), or $\text{Ga}(\text{III})\text{Cl}_3$ (Aldrich). Different samples with different numbers of dip-coating cycles in the sol and different constructions were produced. The structures $\text{ZnO}/\text{ZnO}:\text{Cu}$ or Ga , in which pure ZnO as a bottom layer was overlapped by the upper part with doped ZnO , and vice versa. The area of the overlap between the lower and upper layers were kept $\sim 80 \text{ mm}^2$.

2. *Preparation of $\text{ZnO}/\text{ZnO}:\text{CuO}$ nanowires structures* [7]. The synthesis of ZnO nanowires on a solid substrate consisted of two stages, namely, the deposition of a layer of nuclei and nanowire growth. A layer of nuclei was applied from a $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ solution with a concentration of 5 mmol/L by centrifuging (KW-4A (Chemat Technology Inc.) centrifuge) at a speed of 900 rpm for 10 s and at a speed of 2200 rpm for 20 s followed by air drying. This operation was repeated five times to prepare a layer of ZnO nuclei that can be used for nanowire growth. The substrate was then washed, dried, and annealed at 320°C for 20 min. The entire process of creating nuclei on a substrate was repeated two times, and the substrate with an applied layer of nuclei was washed with distilled water and dried in air. Nanowires were then grown on these substrates from precursor solutions. Solutions $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Sigma_Aldrich, purum p.a. $\geq 99.0\%$) and methenamine (Merck, purum p.a. $\geq 99.5\%$) with a concentration of 50 mmol/L were mixed in the same volumes immediately before the beginning of each growth cycle. The final concentration of each reagent in the precursor solution was 25 mmol/L. Samples were vertically placed in the solution and held at 87°C for 3 h. The substrates were then removed from the solution, washed with distilled water, and located in an as-prepared precursor solution. The growth process was repeated eight times. The prepared layers of zinc oxide nanowires were washed with acetone and distilled water and then dried in air.

For our investigation, it was necessary to form a layer of pure ZnO nanowires that is overlapped with a layer of CuO -doped ZnO nanowires. Such samples were prepared by the immersion of a layer of nanowires to two-thirds of their length into a $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ solution (Valerus, purum p.a. $\geq 99.0\%$) with a concentration of 10 mmol/L. The samples were dried at 75°C for 10 min in air, and the process of immersion was repeated two, four, or six times to grow modified layers with various CuO concentrations. The samples were annealed at 300°C for 10 min.

3. *Preparation of $\text{ZnO}/\text{ZnO}:\text{Fe}$ structures* [8, 12]. Zinc acetate dehydrate $[\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$, 2-methoxyethanol, mono-ethanolamine (MEA) and iron nitrate hydrate, $[\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}]$ were purchased from Fluka. Ceramic substrates Rubalit®710 ($20 \times 10 \times 0.63 \text{ mm}$ and $25 \times 15 \times 0.63 \text{ mm}$) were purchased from CeramTec AG and were used as supports for the films. Nanostructured $\text{ZnO}:\text{Fe}$ thin films were formed on a ceramic substrate via dip-coating technique from sol. The sol was prepared by dissolving $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ in 2-methoxyethanol, to which a weak base MEA was subsequently added. The junctions, composed by two plane-parallel nanostructured thin film electrodes, were prepared as described below. The 2/3 of the entire area of the substrate Rubalit®710 was covered firstly by layer of pure ZnO , produced by three dip-coatings. Then, the same area on the opposite end of the sample was covered by ZnO layer doped with Fe. The overlapping area between the lower and upper layers is kept $\sim 80 \text{ mm}^2$ for all samples for ethanol detection and $\sim 125 \text{ mm}^2$ for bacteria detection. The samples were produced with different thickness of the top layer by varying the number of dip-coatings. The films were dried at 80°C for 30 min after each successive coating. Finally, when the desired thickness of the layer was reached, the sensing junction structure was annealed at 500°C for 60 min.

Response of the investigated structure to ethanol vapour. Test equipment. In the current work different sensing junction structures were tested by means of novel in-house made experimental setup specially designed for investigating the temperature dependence of the potential difference of the different junction structures in the continuous air flow and the changes in the value of the potential difference when these structures are exposed to mixture of vapour of ethanol with air flow. The scheme of this equipment is shown on Fig. 1 [6] (1, 2 – gas cylinders with technical air; 3, 4 – security air locks; 5 – flowmeter for measuring the tiny gas flows (ethanol vapour flow); 6 – flowmeter for measuring the air flow; 7, 8 – drexels with silicagel; 9 – drexel with ethanol; 10 – threefold gas mixer; 11 – aluminium head of the quartz tube; 12 – voltmeter for measuring the potential difference between the overlapped layers; 13 – metal stick, carrying the ceramic sample holder; 14 – quartz tube; 15 – ceramic holder with the sample; 16, 17 – metal pressing-point electrodes, making Ohmic contacts with the sample; 18 – tube heater; 19 – outlet drexel with glycerin [6]).

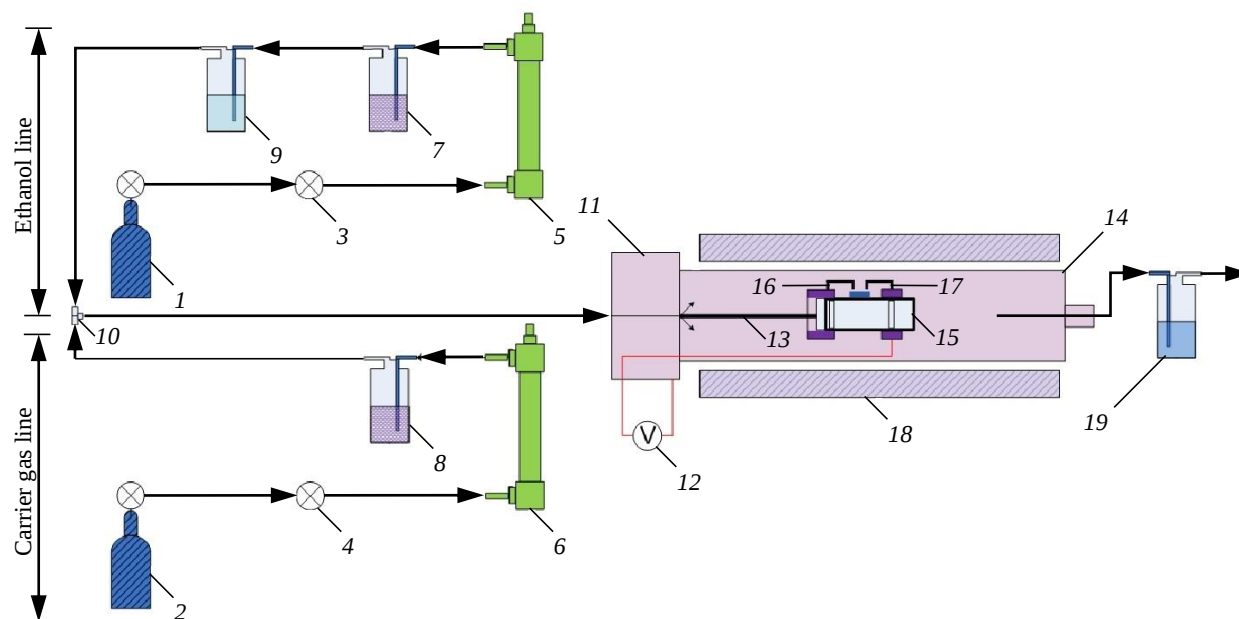


Fig. 1. Scheme of experimental setup

As it can be seen from Fig. 1, by the use of the above measuring equipment we were able to measure the thermoelectric potential difference, ΔU , appearing between the overlapped two parts of the investigated structures. The electric circuit is formed between two overlapped at 80 mm^2 pure and doped with Cu or Ga ZnO layers (ZnO/ZnO:Cu,Ga), pure and doped with CuO layers of nanowires ZnO (ZnO/ZnO:CuO), pure and doped with Fe layers of ZnO (ZnO/ZnO:Fe). At the end of the upper and lower layers of the sensing junction, at about 1...2 mm from the point of the overlap, two point needled electrodes 16, 17, made from stainless steel are pressing on the layers, making Ohmic contacts of the metal to the semiconductor. The needle electrode, connected to the lower layer is attached to the metal stick, carrying the ceramic sample holder. The ceramic holder is connected to the aluminum head of the quartz tube, from where a connector is going to the common input of the voltmeter 12.

The other needle electrode, connected to the upper layer is connected through isolated thermo resistive wire to the other input of the same Voltmeter. By this way, voltmeter 12 is connected to the both wires, coming from the sample and measures the potential difference between the overlapped two layers of the sensing structure.

The ceramic holder 15, together with sample attached by pressing with two metal electrodes is placed onto the quartz tube 14. The tube heater 18 is used for heating quartz tube together with the sam-

ple. The tube heater is supplied by its own power supply, which allows slowly changing of the temperature. After the desired value of the temperature was reached, it was kept stable by means of Voltage Stabilized (not shown on Fig. 1). The temperature was measured by standard thermocouple Chromel-Alumel, connected to other Voltmeter. Mixing of the flows of the ethanol vapour with dry air provides the particular ethanol concentration. The flowing of air for ethanol and dry gas lines are provided by standard bottles of dry air under high pressure 1, 2, with standard reducing valves on each. From the bottles of air, flows goes through security air locks. Air locks are connected to the flowmeters 5, 6, which needles' valves allows regulation of the air flows very precisely. After this, the flows goes through two Drexels with silicagel 7, 8 for filtration and additional drying of the air. After that, the tiny gas flow goes into the Drexel with ethanol 9, where the air is saturated with ethanol vapour. These two flows, the dry air and the saturated with ethanol vapour air flow, were mixed by three-fold gas mixer 10. After mixing, the resulting flow with certain known concentration of ethanol vapour goes into the quartz tube and gets into contact with the sample. For preventing an outside flow into the experimental system, at the output the gas mixture goes through Drexel with glycerin.

Results and discussions. 1. *Temperature dependence of the potential difference of obtained ZnO/ZnO:Cu junctions in air flow and in the flow of mixture of air with ethanol vapour with concentra-*

tion of 1500 ppm. For each of the samples the temperature dependence of the potential difference in air flow and in 1500 ppm concentration of ethanol vapour was investigated. The 1500 ppm concentration was produced by the mixing of flow of air and flow of saturated ethanol vapour.

Temperature dependence of the potential difference in the air and in the flow of mixture of ethanol vapour with air having concentration 1500 ppm for different ZnO/ZnO:Cu structures, upper layers of which is produced by certain number of dip-coating cycles into the having 3 at. % Cu sol is shown on Fig. 2 [6].

How it can be seen from Fig. 2, *a*, *b*, the behavior of the potential difference in the air flow with increasing the temperature is completely different for the samples with the top layer produced by two and three coating cycles into the Cu contained sol. In the case of upper layer produced by two dip-coating cycles the potential difference firstly increases with the temperature up to the value of about 2.35 mV at 290 °C and then decrease down to the value of about 1.5 mV at 303 °C (Fig. 2, *a*).

With increasing the temperature two processes are happening into the upper ZnO layer, which are account for observed on Fig. 2, *a* results:

1) because ZnO is an *n*-type semiconductor material, its resistance will decrease with increasing temperature because more electron-hole pairs are generated. Because of the electron-hole pairs generation, the thermoelectric coefficient α_{top} of the upper layer of the investigated structure is getting more negative value. That leads to the increase of the total potential difference as positive value;

2) oxygen ionosorption removes the conduction electrons from conduction band of ZnO and by this way increases its resistance. At temperatures fewer than 150 °C, the molecular species dominate, while

above this temperature the atomic species dominate, which can allow capturing one or two electrons from conduction band of ZnO with increasing of the temperature [13].

If we neglect the dependence of the Seebeck coefficient α on the temperature, the resulting expression for the potential difference ΔU takes the form [14]:

$$\Delta U = \Delta U_1 - \Delta U_2 = (\alpha_{\text{bot}} - \alpha_{\text{top}}) \Delta t.$$

Because of this process the thermoelectric coefficient α_{top} of upper layer is getting less negative value, which will make the total potential difference to decrease as positive value as can be considered from the formula. The observed on Fig. 2, *a* trend of the changing the total potential difference in the case of ZnO/ZnO:Cu structure, with upper layer produced by two dip-coatings cycles into the sol, containing 3 at. % Cu is a result of these two processes. The α_{top} of upper layer is increased as a negative value, up the temperature of 290 °C, because up to that temperature the generation of charge carriers in this layer more strongly affects the total potential difference of the sensing structure than the depletion layer, caused by the oxygen ionosorption on the surface of the overlap. As it can be seen, due to the dependence of the potential difference from the temperature in the atmosphere, the total potential difference is increasing up to 290 °C and is decreasing after that (Fig. 2, *a*).

The potential difference in the air flow has zero value up to 277 °C when the top layer is produced by three dip-coatings into the sol, after which gradually decreases as negative value down to -1.85 mV at the temperature 345 °C (Fig. 2, *b*). The reason for this could be understood by taking again into account formula. It could be seen that because of both α_{bot}

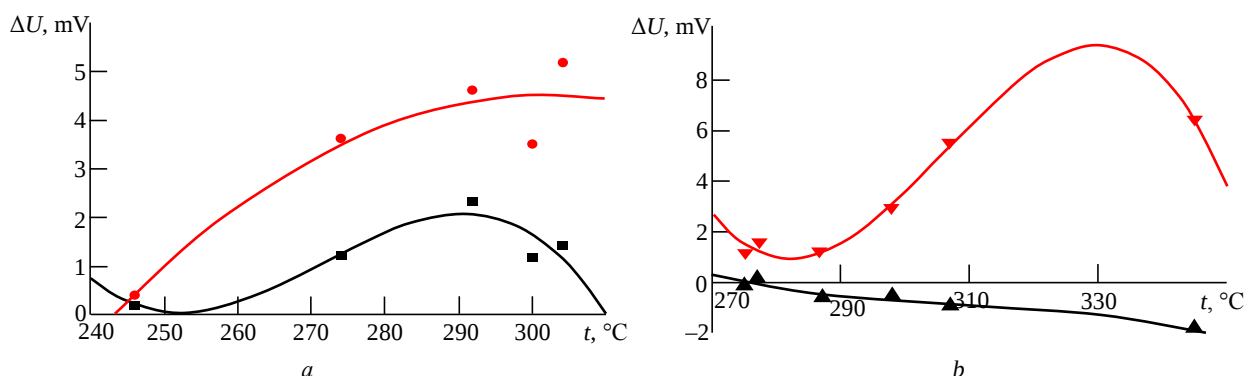


Fig. 2. Temperature dependence of the potential difference for ZnO/ZnO:Cu structures, with upper layer produced from the sol containing 3 at. % Cu by: *a* – two dip-coating cycles; where: ■ – at the air, ● – at ethanol vapour with concentration 1500 ppm; *b* – by three dip-coating cycles where ▲ – at the air, ▼ – at ethanol vapour with concentration 1500 ppm [6].

and α_{top} being negative, with the temperature increasing, the potential difference will be getting more negative value. This is possible when the thermoelectric coefficient α_{bot} of down layer has larger negative value than the thermoelectric coefficient α_{top} of upper layer, and the latest having not such a big negative value. The observed gradual increase of the potential difference as negative value could be happening when increasing the temperature leads to the electron-hole pair generation in the lower layer and has more pronounced effect than generation of electron-hole pairs in the upper layer. The thermoelectric coefficient α_{top} of upper layer won't have so negative value, and we will have small value of negative total potential difference, which will get more negative along with increasing the temperature, because it is determined mainly by the thermoelectric coefficient α_{bot} of the down layer. This probably is related to the increase degree of crystallization with increasing the size of the particles of the top film with increasing the number of coatings (Fig. 2, b), which was proven in one of our previous work [15]. The increased degree of crystallization will reduce the number of point defects, which are the main source of electrons into ZnO and by this will make the above mentioned effect of Cu doping more pronounced in the reduction of the number of electrons generated into the top layer.

2. *Ethanol vapour concentration dependence of ZnO/ZnO:Cu junction structures.* At the temperature at which each of the samples has the maximum value of the sensitivity, the dependence of the potential difference on the concentration of ethanol vapour was investigated. The dependence of the potential difference on the ethanol concentration for the samples with the different number of dip-coating cycles,

at the temperature where the sensitivity of the samples has the maximum value, is shown on Fig. 3 [7].

Measuring the ethanol concentration dependence of the samples at $t = 306 \pm 2^\circ\text{C}$ and at $t = 300 \pm 2^\circ\text{C}$ is done for the samples with upper layer produced by two and three dip-coating cycles, respectively.

Results for both of the samples show that no matter of the numbers of dip-coating cycles, with each upper layer is produced, the potential difference increases nonlinearly as a function of ethanol concentration. The concentration of electrons n_{bot} in the layer on the bottom of the sensing structure doesn't change during the ethanol detection at constant temperature. However, during the interaction with ethanol, due to the transfer of electrons between the adsorbed on the ZnO surface oxygen ions, attracted are one or two electrons from the conduction band of ZnO. The concentration of electrons n_{top} in the top layer of sensing structure (doped with Cu ZnO) will change. Those oxygen ions interact with ethanol molecules, and return back captured one or two electron into the conduction band of ZnO, and that leads to increasing of the concentration of electrons n_{top} in the top layer of sensing structure. This will give the nonlinear trend of the change of the total potential difference ΔU with the change of the concentration of ethanol vapour. It can be seen that with increasing the concentration of ethanol, the potential difference is increasing nonlinearly and for the sample, having upper layer produced by 3 dip-coating cycles, increasing is much more. In both of the cases increasing comes to saturation and for two dip coating cycles sample, saturation comes early, even though the sensitivity is less.

3. *Temperature dependence of the potential difference of obtained ZnO/ZnO:CuO nanowires junctions in air flow and in the flow of mixture of air with etha-*

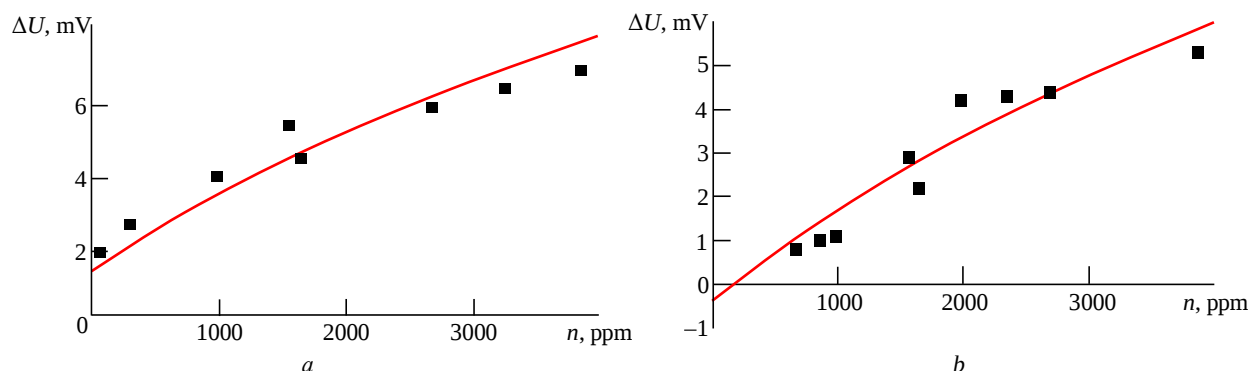


Fig. 3. Ethanol concentration dependence of the potential difference for ZnO/ZnO:Cu structures, produced by dip-coatings into having 3 at. % Cu in the case of upper layer produced by: a – two dip-coating cycles; b – three dip-coating cycles

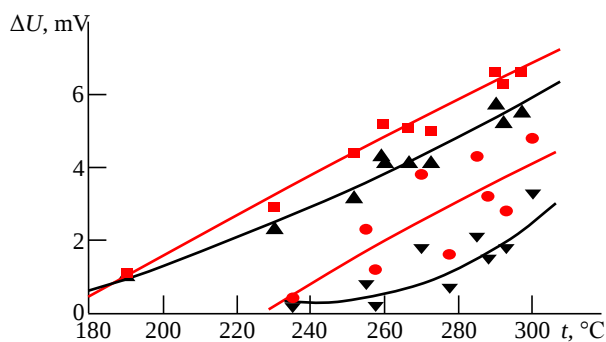


Fig. 4. Temperature dependence of the potential difference for ZnO/ZnO:CuO in the air ($\blacktriangledown$, $\blacktriangle$) and under exposure of ethanol vapor concentration ($\bullet$, $\blacksquare$), produced by 4 и 6 immersions in the solution of $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

not vapour with concentration of 1000 ppm. Sensor structures with various CuO contents were studied at various detection temperatures and ethanol vapor concentrations using a device, shown on Fig. 1.

The temperature dependence of the potential difference of nanowire samples ZnO/ZnO:CuO in air and in ethanol vapors at a concentration of 1000 ppm is shown in Fig. 4 [7].

As is seen from Fig. 4, the potential difference between the nanowires of pure and CuO-modified zinc oxide increases with the number of immersions for the nanowire layers formed at 4 and 6 immersions in the $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ solution. This phenomenon is caused by the fact that, as the number of immersions increases, a large quantity of ZnO dissolves and then crystallizes in the form of flower-like island structures. The conditions of crystallization of these structures are far from equilibrium; therefore, they contain many defects, including oxygen vacancies and Zn interstitial atoms. As a result, the modulus of thermoelectric coefficient α_{top} (which has a negative value) of the CuO-doped ZnO nanowire layers in the structures under study increases, which favors an increase in the total potential difference (positive value). In the case of the structure formed upon four immersions, the potential difference in air changes nonlinearly, whereas the potential difference in the case of six immersions changes linearly with temperature.

The linear behavior is explained by the fact that ZnO is an *n*-type semiconductor, and its resistance decreases with increasing temperature because of the generation of additional electron-hole pairs. As a result of the generation of electron-hole pairs, thermoelectric coefficient α_{top} of the modified layer in the structure under study becomes high in modulus

(it is a negative value), which leads to an increase in the total potential difference as a positive quantity (see Fig. 4).

The nonlinear character of the temperature dependence of the potential difference in the case of four immersions in the sol is caused by the fact that the crystal structure of the ZnO nanowire layer has a small number of point defects because of a small amount of recrystallized ZnO. When the number of defects is small, the concentration of electrons, which are the main charge carriers in ZnO, is also rather low. In this case, the thickness of a depleted charge region is larger as compared to the structure formed upon six immersions. This feature causes a stronger modulation of thermoelectric coefficient α_{top} of the modified layer because of oxygen ion sorption, which increases the resistance of ZnO [16]. Because of oxygen ion sorption, thermoelectric coefficient α_{top} of the modified layer becomes lower in modulus (it is still negative), which causes a decrease in the potential difference as a positive quantity and leads to a nonlinear increase in the potential difference with temperature of the sample formed upon four immersions.

In both cases, however, the potential difference increases in ethanol vapors, since the electrons trapped during oxygen ion sorption on the surface return to the conduction band of ZnO during the interaction of ion sorbed oxygen with ethanol molecules and, hence, increase the electron concentration in the upper layer. In this case, thermoelectric coefficient α_{top} of the modified layer in the structure under study becomes a more negative quantity and, hence, increases the potential difference as a positive quantity.

It is seen from the temperature dependence of the measured potential difference that the response of the ZnO/ZnO:CuO nanostructures formed upon four immersions under the action of ethanol vapors is significantly higher than in the case of six immersions in the $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ solution. This result can be related to the CuO content in the samples. Being a *p*-type semiconductor, CuO adsorbs the molecules having unpaired electrons, such as ethanol and molecular oxygen, and interacts with their unshared electron pairs [17]. After such molecules are adsorbed by the ZnO surface (where ion-sorbed oxygen is inevitably present), the reaction that increases the sensitivity of the structure formed upon four immersions in the solution takes place. As the number of

immersions increases, the quantity of dissolved and recrystallized ZnO increases along with increasing localization of active molecules on the ZnO surface. As a result, the sensitivity of the structure decreases, since the increase in the number of electrons in ZnO that is induced by an increase in the fraction of ZnO containing a large number of point defects leads to a decrease in the Debye length and, hence, to a smaller modulation of the measured potential difference.

4. *Ethanol vapour concentration dependence of ZnO/ZnO:CuO junction structures.* The potential difference of the structures under study as a function of the ethanol vapour concentration is also of interest. This dependence is related to the change in the charge transfer caused by the interaction of various numbers of ethanol molecules with the surface of the modified layer in the structures. Some results are presented in Fig. 5 [7], where the ethanol vapor concentration is varied from 0 to 3500 ppm at a working temperature $t = 268 \pm 2^\circ\text{C}$.

It is seen that the sensitivity of the structure of ZnO/ZnO:CuO nanowires formed upon four immersions in the $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ solution is higher than that of the structure of ZnO/ZnO:CuO nanowires formed upon six immersions in the $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ solution according to the causes described above. However irrespective of the technological conditions of structure formation, the sensitivities of the prepared sensor structures have a nonlinear dependence on the ethanol vapor concentration, which is promising for designing high-sensitivity sensors operating at low temperatures.

Obviously, the potential difference increases noticeably as the ethanol vapor concentration in an air flow increases, which provides the sensitivity of the grown ZnO films to organic molecules. The response of this sensor to ethanol is potentiometric and characterized by a nonlinear dependence of the potential difference on the concentration, according to the

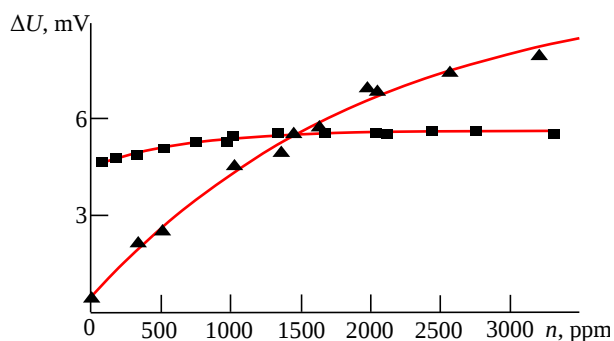


Fig. 5. Ethanol concentration dependence for the structure ZnO/ZnO:CuO (▲) 4 immersions in solution of $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$; (■) 6 immersions in solution of $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ at detection temperature of $268 \pm 2^\circ\text{C}$

Nernst equation [18]. A change in the CuO concentration in the modified layer also substantially affects the functional properties of the formed structures.

5. *Temperature dependence of the potential difference of obtained ZnO/ZnO:Fe junctions in air flow and in the flow of mixture of air with ethanol vapour with concentration of 1000 ppm.* Temperature dependence of the of thermo-electromotive force (EMF) (the potential difference) in the air and under 1000 ppm ethanol vapour exposure for ZnO/ZnO:Fe structures having different thickness and morphology of the ZnO:Fe layer is investigated in order to find out the lowest operation temperature with maximum sensitivity (shown in Fig. 6 [8]).

From Fig. 6 it can be seen that the temperature dependence of EMF at the atmosphere for the structure ZnO/ZnO:Fe, produced by two dip-coatings of the upper layer in Fe modified sol have the value of $\Delta U = -8.5\text{ mV}$ at the temperature of 190°C . With increasing the temperature, the potential difference is also increasing, passing through $\Delta U = 0$ at the temperature of 240°C and reaching the value of $\Delta U = 9.5\text{ mV}$ at the temperature of $t = 295^\circ\text{C}$ (Fig. 6). When the upper layer of ZnO/ZnO:Fe structure is produced by three dip-coatings in the Fe modified sol, $\Delta U = 0$ at the temperature of $t = 190^\circ\text{C}$. With increasing the temperature, potential difference increasing almost linearly, reaching the value of $\Delta U = 13.25\text{ mV}$ at temperature of 350°C (Fig. 6). It is interesting to note that no matter of number of dip-coatings of the upper layer of the structures, the potential difference of both structures becomes equal to the value $\Delta U = 3.5\text{ mV}$ at the temperature of $t = 255^\circ\text{C}$. After that the temperature dependence of the potential difference goes almost linearly and very close for both structures.

Under exposure of ethanol vapours within the the potential difference always increase with the increas-

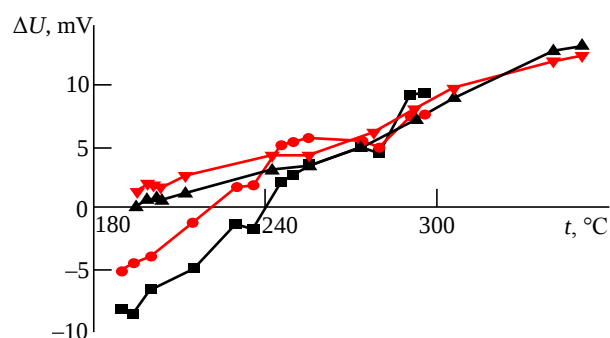


Fig. 6. Temperature dependence of the potential difference for ZnO/ZnO:Fe structures with upper layer produced by dip-coating into 3 at. % Fe contained sol by means of: ■, ● – two dip-coatings in the sol; ▲, ▼ – three dip-coatings in the sol, in the air (■, ▲) and under 1000 ppm ethanol vapour exposure (●, ▼), respectively

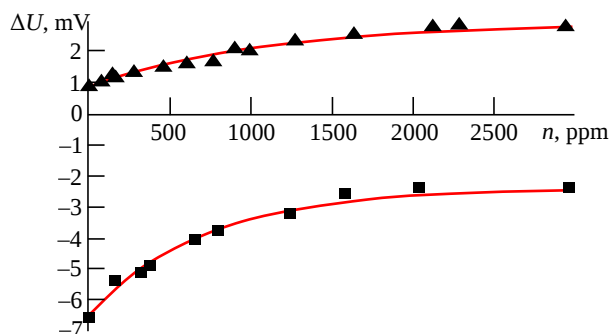


Fig. 7. Ethanol concentration dependence at $t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ for the ZnO/ZnO:Fe structures with upper layer produced by dip-coating in the sol, containing 3 at. % for the case of : ■ – two dip-coatings in the sol ; ▲ – three dip-coatings in the sol

ing of the temperature (Fig. 6). The reason for this is the charge transfer because of the interaction between oxygen of ethanol and zinc cation from interstitial site into the Fe–ZnO thin film. We have measured the potential difference of the ZnO/ZnO:Fe structures at operation temperature of $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ as function of ethanol vapour concentration. The results are shown in Fig. 7 [8].

As could be seen for the for the ZnO/ZnO:Fe structure with upper layer produced by two dip-coatings in the sol, the measured by us potential difference has negative value over the all of the investigated range of ethanol vapour concentrations and changing from -6.6 mV in the air up to -2.4 mV at the concentration of ethanol vapour 3000 ppm

(Fig. 7). When the upper layer of the ZnO/ZnO:Fe structure is produced by three dip-coatings in the sol, the measured by us potential difference has positive value over the all of the investigated temperature range and changing from 0.9 mV in the air up to 2.8 mV at the concentration of ethanol vapour 3000 ppm (Fig. 7). However, the measured by us potential difference is reaching the saturation value at about 2000 ppm in of the both cases.

Response of ZnO/ZnO:Fe structure to bacterial suspension. 1. *Experimental installation for bacteria detection.* *Pseudomonas putida* is used as a surrogate of the pathogen *Pseudomonas aeruginosa*, which often causes nosocomial infections. In the present paper we try to produce a biosensor for detection of pathogenic bacteria transmitted by air. That is why we did not test *E.coli*, which is an inhabitant of polluted water.

In order to investigate the sensing properties towards bacteria we have constructed the experimental installation, shown in Fig. 8. All of the blocks used to construct this apparatus are situated at atmospheric pressure into the same thermostatic chamber from polymethylmetacrylate, shown in Fig. 8 [11].

The electronic devices are situated out from this box. This constructive solution has he following advantages: one electronic thermoregulator is used to regulate automatically the temperature of all the blocks included inside the box, not only of

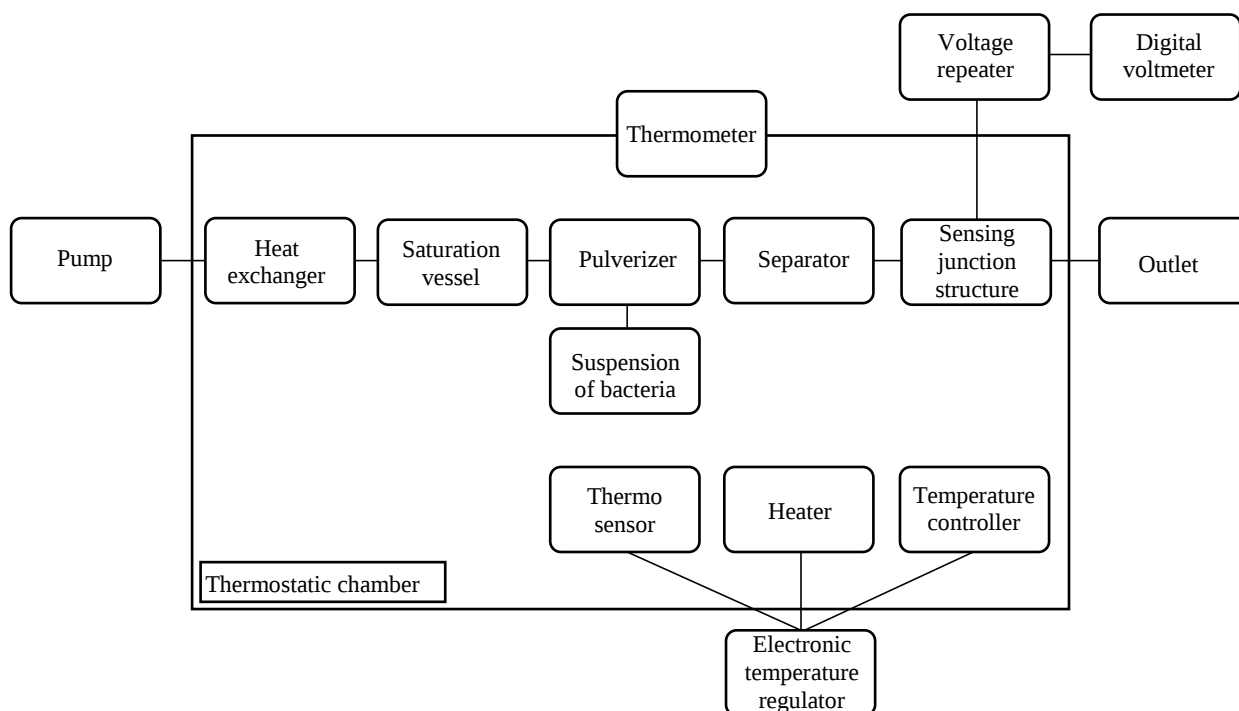


Fig. 8. Experimental installation for bacterial detection

investigated sensing device. By this way there is no reason other devices to be kept at constant temperature and the accuracy of maintaining the temperature of the sensor system is increased.

As it is mention above, the thermostat is constructed from polymethyl metacrylate. The thermostatic chamber is formed from plates with the thickness of about 10 mm. By this way the area of the box is better thermo-isolated from surrounding environment than if the box was constructed by other thermo-isolated materials. In addition of that polymethylmetacrylate allows to control all of occurred processes and it is much stronger in comparison with glass and other transparent materials.

The main part of the apparatus is built on modular principle, which makes its service and repair easy and convenience in modification if nessasary. The functional blocks (modules) following the line of carrier-gas are shown in Fig. 8:

1) the heat exchanger for incoming gas coming from the pump is made in form of copper spiral in order to increase the exchange of heat between the heater and environment by equalization of the temperature of incoming gas flow and stated at the thermostat;

2) the glass G20 saturation vessel is Drexel bottle, having a NS35 polishing on the neck and porosity G1 of the glass bubbler. The purpose of this facility is preliminarily saturation of the carrier gas with water vapour for preventing the bacteria in the aerosol from drying. It can also be used for introducing some substance into the carrier gas;

3) the pulverizer is made from non-corrosive materials, such as stainless steel 314, Polytetrafluoroethylene (Teflon, PTFE) and glass in order to avoid its interaction with working fluids. It is used for dispersion of bacterial suspension into aerosol condition;

4) the separator is made of G20 glass/Pyrex. It is used for removal of large droplets from the aerosol. The aerosol becomes more dispersive and with higher degree of refinement after passing through the separator;

5) well dispersed aerosol interacts with the sensing junction structure and the alterations are monitored by the electronic device. The system for the electrical measurement of experimental set-up includes a digital voltmeter. It has six decimal positions on the screen of display with voltage ranges of 0.1 V with accuracy of 1 μ V up to 1·10³ V with accuracy of 1 mV. The coverage of internal resistance

is $R_i \geq 2 \cdot 10^{10} \Omega$ at the ranges of 1 V & 10 V, and

$R_i \geq 2 \cdot 10^9 \Omega$ at range of 0.1 V, both of it at direct current. This device has the port for connection with computer and possible distance control. The total description of protocol is reviewed at detailed technical documentation of the device. To increase the input resistance, the complete set of the device included voltage repeater, allowing increasing of R_i up to 10¹³. The repeater is constructed on the basis of the integral schemes and can be considered as independent unit having an own power supply.

The principle of operation of the electronic temperature regulator shown on Fig. 8, is shown more detailed in Fig. 9 [11].

From there can be seen it consists of Thermo sensor, Heater and Temperature controller. The circulation of air into the thermostat is promoted by small noiseless ventilator, shown on Fig. 9 and covered with a protective cowling. A heater and a circuit-breaker against accidental overheating are also placed into the thermostat. The electronic temperature controller consists of a semiconductor resistance type thermo sensor. It has a cover from stainless steel and copper tip for a good thermal contact with the surrounding environment. The sensor cover is hermetic in order to protect it from accidental effect of harsh exposures.

Regulating the temperature is conducted by heat exchanger, operating on analogous comparison of incoming order and suitably multiplied signal from the temperature sensor. The comparator is a standard integral circuit brand μ 723 in corresponding special scheme connection. The order is formed by means of multiturn (helical) potentiometer; the amplification device is combination of part of integral circuit brand μ 723, combined with relay output. The heating element has a power of 300 W. It possesses very low own weight and insignificant heat capacity as well.

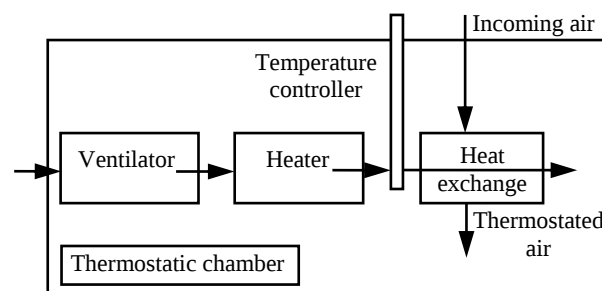


Fig. 9. The temperature regulation into the thermostatic chamber

The last property is necessary for increasing stability of temperature regulation against oscillation after achieving the steady regime.

The holder of the sensing structure is made of materials with high resistance to the working fluids (Fig. 10, 1 – BNC (Bayonet Neill-Concelman) connector; 2 – Bacterial aerosol; 3 – Sensing junction structure; 4 – Beryllium brass springs; 5 – PTFE table; 6 – Holder stage [8]); stainless steel 314, PTFE, silicon rubber, oxygenized aluminium, brass, Pyrex glass. The electrical connection of sensing structure is realized by BNC cable 1. The sprayed aerosol 2 is deposited directly on the sensing structure 3. To avoid formation of continuous liquid layer on the sample surface, the flow of the extra liquid down from the sample is ensured. The electric contacts to the sensing structure are in the form of needles. They are made of gilded phosphoric bronze (beryllium bronze). Their pressing with suitable force on the sample surface is realized by two Beryllium Brass springs 4. The force with which they are pressed on the sample must be strong enough to deform locally the crystal structure of ZnO. This is necessary in order to make different point defects, which perform the Ohmic electrical contacts to ZnO layer. But the force must be not too strong to make the pin holes and to lose electrical connection with the sensing structure. The construction and materials are chosen with high insulation resistance in order to minimize the leakage currents outside from the sensing structure.

The discharge system is designed in order to bring the aerosol out from working area for

conceivable disposal. The materials used in construction of this part of the installation are silicone rubber and Pyrex glass. From preventing the outside flow into the experimental system at the output the gas mixture goes out through Drexel bottle filled with Glycerin.

All the building blocks of the experimental set up, which are exposed to the aerosol, can withstand potentially harmful materials and are also resistant to heat sterilization. Because of these considerations as well as taking into account that the system should be transported without difficulties, all of the details which could be exposed to dangerous species are built up as detachable units into a small box made from polymethylmetacrylate.

2. *Microorganisms*. Microorganisms and Cell Cultures (NBIMCC) and is referred as ATCC 12633. It was cultivated in two types of nutrient media: the rich natural one and the poor synthetic medium ISO 12072. The bacterial culture for experiments with the biosensor was prepared from frozen at -15°C for 24 h. *Pseudomonas putida* culture stored in Eppendorf tubes with glycerol, having density of 10^6 CFU cm^{-3} (CFU – colony-forming unit). The fresh culture was obtained after 24 h cultivation on rich liquid ISO10712 medium at $23...25^{\circ}\text{C}$ and three sub-cultivation procedures in liquid pretest medium described also in the same standard ISO10712. After the third sub-cultivation the cells were washed three times with deionized water to remove all ions from the culture medium. As the *Pseudomonas putida* is usual both air and water inhabitant, it could grow and multiply in drinking water. In deionized water the cells could survive up to a month. That is the reason that makes necessary the determination of the live bacterial quantity by means of cultivation methods every time in the day of experiment with the biosensor.

The bacterial suspension in an exponential growth phase (12...18 h) was centrifuged after the third subcultivation in poor synthetic medium at 10 000 rpm for 20 min, the water was decanted and the bacterial pellet was suspended in deionized water. The same wash was repeated 3 times in order to remove all ions from the bacterial cells. The bacterial pellet was kept at 4°C in 100 μL deionized water. Then at the day of the experiment immediately tenfold dilution was prepared in deionized water, inoculated and cultivated on the rich medium to determine the quantity of survived bacteria. Several dilutions of bacteria were used for the measurements

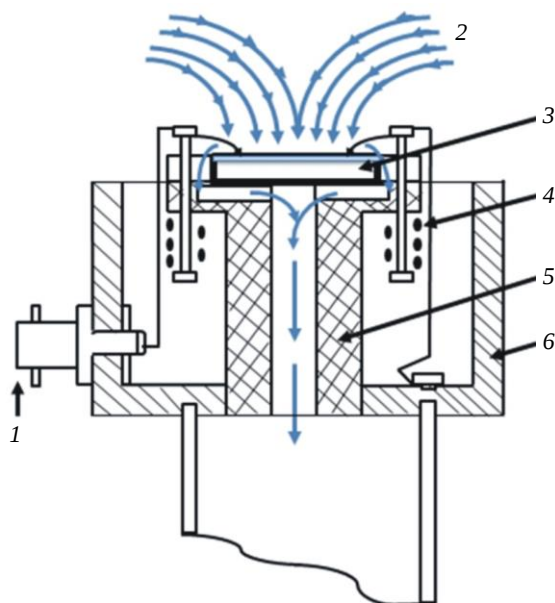


Fig. 10. Holder of the sensing junction structure

of ZnO/ZnO:Fe thin films sensitivity as a function of bacteria amount.

3. Experimental investigation for bacteria detection as a function of bacteria amount. For investigating sensing properties of ZnO/ZnO:Fe junction structures to bacteria the thermoelectric potential difference is measured at constant temperature (37 °C) under exposure to air, pulverized water, and pulverized *Pseudomonas putida* suspension. The temperature of the experiment was chosen as intermediate between the most suitable temperature for bacteria to survive and the existing of big enough for detecting potential difference at our sensing structure. The aseptic standards are maintained as all operations are performed in the laminar Bio-hood, which provides a sterile atmosphere. The quantity of live bacteria was determined on nutrient agar medium and every time the purity of the culture was checked by microscope before the experiment with the biosensor. The electrical measurement is performed at least one hour after turning the equipment on. This time was enough for warming up the equipment and stabilization of voltage values on the screen of the potential difference measuring device and the temperature in the box as well. It is established that the response of ZnO/ZnO:Fe junction structures to water vapor is insignificant in comparison to the bacteria's response. In addition of that the amplitude and half-width of the peaks are much smaller in comparison with those under bacterial suspension exposure. It should also be mentioned that both the response and the recovery time in the case of bacterial detection are much slower than in the case of water vapor exposure. Some of the most representative results of alteration of the potential difference under exposure of different amount of *Pseudomonas putida* suspension are shown in Fig. 11. The response of different ZnO/ZnO:Fe junction structures having upper (working) layer produced by: three dip-coating cycles into Fe modified sol (upper part); two dip-coating cycles into Fe modified sol (lower part); under exposure of bacterial suspension of *Pseudomonas putida* (the amount of bacteria is 60, 150, 157 CFU for volume bacterial suspension of 10, 500, 1000 μL , respectively [12]).

The results show that alteration of the potential difference of ZnO/ZnO:Fe junction structures under *Pseudomonas putida* suspension exposure depends strongly on the amount of bacteria suspension. The sensor response of the sensing structures depends on

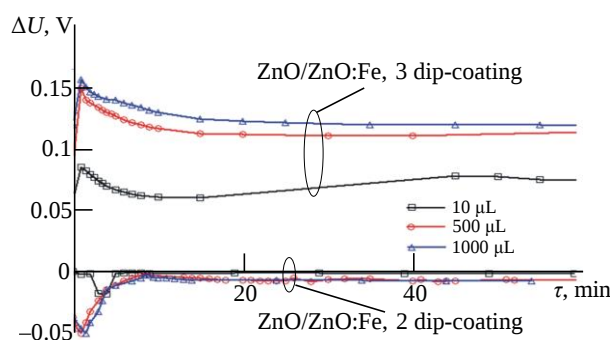


Fig. 11. The response of different ZnO/ZnO:Fe junction structures having upper (working) layer

the surface morphology of the ZnO:Fe films used as working layers of the ZnO/ZnO:Fe junctions. The morphology changes drastically as a function of a number of dip-coating of substrate in the Fe containing sol, as shown in the case, where the response of only geometrically different structures to ethanol vapors is investigated [12]. It is clear that in our case we are not dealing with the interface phenomena, because the changing the number of dip-coatings does not change the conditions of the interface between the pure and Fe modified ZnO, but changing only structure and morphology, which changing the concentration of charge carriers, affecting by this way the thermoelectric properties of the layers. That is the reason why with changing the number of dip-coating for producing the upper layer of investigated structures we are able to change even sign of the value of the potential difference. In case of ZnO layer doped with Fe, deposited by two dip-coatings on pure ZnO, the ganglia-like-hills are uniformly situated. Moreover, when ZnO doped with Fe is deposited by three dip-coatings, the average thickness of the ganglia-like-hills is in much larger range in comparison with layer of ZnO doped with Fe produced by two dip-coating in Fe containing sol. Such functional nanostructures with dimensions comparable to Debye's length ($\sim 0.3 \mu\text{m}$ for undoped ZnO at room temperature [19]) are some of the advantages of sol-gel technology, in addition to smoothness, continuity, and a homogeneity of the composition [8]. As expected, the response to bacterial suspension is completely different in the cases of different surface morphology. For the ZnO/ZnO:Fe junction structure which has upper (working) Fe modified ZnO layer produced by three dip-coating cycles into the Fe modified sol, the potential difference has a positive value and increases with increasing the amount of the pulverized bacteria (upper part in Fig. 11). When

dealing with ZnO/ZnO:Fe junction structure which has upper (working) Fe modified ZnO layer produced by two dip-coating cycles into the Fe modified sol, the situation is completely different. In the second case, the potential difference has a negative value and decreases with increasing the amount of the pulverized bacteria (down part in Fig. 11).

Summary of main results from this work. The main results of this work could be summarized as follows:

1) we have found that for the ZnO/ZnO:Cu junction structures ability to detect ethanol vapour, the top layer must be formed of three dip-coatings into the sol, containing 3 at.% Cu and the lower layer must be pure ZnO. In this case the maximum of sensitivity to ethanol vapour is at temperature of 278 °C;

2) the response of ZnO/ZnO:CuO nanowires junction structures formed upon four immersions under the action of ethanol vapors is significantly higher than in the case of six immersions in the Cu(NO₃)₂ solution. In this case the maximum of sensitivity to ethanol vapour is at temperature of 268 °C;

3) the sensitivity to bacterial suspension of ZnO/ZnO:Fe sensing structures, with upper (working) layer produced by two dip-coating cycles, is much higher than the sensitivity of ZnO/ZnO:Fe structures, with upper (working) layer produced by three dip-coatings. When dealing with ZnO/ZnO:Fe junction structure which upper (working) Fe modi-

fied ZnO layer is produced by two dip-coating cycles into the Fe modified sol, the potential difference has a negative value and decreases with increasing the amount of the pulverized bacteria.

Conclusions. Based on measurements done on different sensing junction structures, investigate in this work, we discovered that ZnO/ZnO:Fe structure, with upper layer, produced by two dip-coating in the sol, has the lowest operation temperature of 200 °C. This operation temperature is a bit higher than operation temperature of 300 K presented in [9] and 100 °C [13] at which some very novel sensing structures show the maximum sensitivity. The measured by us potential difference has negative value over the all of the investigated range of ethanol vapour concentrations and changing from –6.6 mV in the air up to –2.4 mV at the concentration of ethanol vapour 3000 ppm. For the ZnO/ZnO:Fe junction structure which has upper (working) Fe modified ZnO layer produced by three dip-coating cycles into the Fe modified sol, the potential difference has a positive value and increases with increasing the amount of the pulverized bacteria. When dealing with ZnO/ZnO:Fe junction structure which has upper (working) Fe modified ZnO layer produced by two dip-coating cycles into the Fe modified sol, the potential difference has a negative value and decreases with increasing the amount of the pulverized bacteria

References

1. Wolkenstein F. F. Electronic Processes at the Surface of Semiconductors During the Chemosorptions. 1st ed. Moscow, *Nauka*, 1987, 432 p. (In Russ.)
2. Xu J., Han J., Zhang Y., Sun Y., Xie B. Studies on Alcohol Sensing Mechanism of ZnO Based Gas Sensors. *Sens. Actuators B*. 2008, vol. 132(1), pp. 334–339. doi: 10.1016/j.snb.2008.01.062
3. Comini E. Metal Oxide Nano-Crystals for Gas Sensing. *Anal. Chim. Acta*. 2006, vol. 568 (1–2), pp. 28–40. doi: 10.1016/j.aca.2005.10.069
4. Paraguay D. F., Miki-Yoshida M., Morales J., Solis J., Estrada L.W. Influence of Al, In Cu, Fe and Sn Dopants on the Response of Thin Film ZnO Gas Sensor to Ethanol Vapour. *Thin Solid Films*. 2000, vol. 373, pp. 137–140. doi: 10.1016/S0040-6090(00)01120-2
5. Stambolova I., Konstantinov K., Vassilev S., Peshev P., Tsacheva T. Lanthanum doped SnO₂ and ZnO Thin Films Sensitive to Ethanol and Humidity. *Mater. Chem. Phys.* 2000, vol. 63 (2), pp. 104–108. doi: 10.1016/S0254-0584(99)00193-5
6. Dimitrov D. Tz., Nikolaev N. K., Papazova K. I., Krasteva L. K., Pronin I. A., Averin I. A., Bojinova A. S., Georgieva A. Ts., Yakushova N. D., Peshkova T. V., Karmanov A. A., Kaneva N. V., Moshnikov V. A. Investigation of the Electrical and Ethanol-Vapour Sensing Properties of the Junctions Based on ZnO Nanostructured Thin Film Doped with Copper. *Appl. Surf. Sci.* 2017, vol. 392, pp. 95–108. doi: 10.1016/j.apsusc.2016.08.049
7. Peshkova T. V., Dimitrov D. Ts., Nalimova S. S., Kononova I. E., Nikolaev N. K., Papazova K. I., Bozhinova A. S., Moshnikov V. A., Terukov E. I. Structures of Nanowires with ZnO–ZnO:CuO Junctions for Detecting Ethanol Vapors. *Tech. Phys.* 2014, vol. 59 (5), pp. 771–776. doi: 10.1134/S1063784214050259
8. Pronin I. A., Dimitrov D. Tz., Krasteva L. K., Papazova K. I., Averin I. A., Chanachev A. S., Bojinova A. S., Georgieva A. Ts., Yakushova N. D., Moshnikov V. A. Theoretical and Experimental Investigations of Ethanol Vapour Sensitive Properties of Junctions Composed from Produced by Sol-Gel Technology Pure and Fe Modified Nanostructured ZnO Thin Films. *Sens. Actuators A*. 2014, vol. 206, pp. 88–96. doi: 10.1016/j.sna.2013.11.035
9. Kuo G.-H., Wang H. P., Hsu H. H., Wang J., Chiu Y. M., Jou C.-J. G., Hsu T. F., Chen F.-L. Sensing of Ethanol with

Nanosize Fe–ZnO Thin Films. J. Nanomater. 2009, vol. 2009, Article ID 316035. doi: 10.1155/2009/316035

10. Nirmala M., Anukalian A. Synthesis and Characterization of Undoped and TM (Co, Mn) Doped ZnO Nanoparticles. Mater. Lett. 2011, vol. 65 (17–18), pp. 2645–2648. doi: 10.1016/j.matlet.2011.06.029

11. Dimitrov D. Tz., Krasteva L. K., Lyutov L. G., Pronin I. A., Ivanova I. A., Kaneva N. V., Papazova K. I., Averin I. A., Bojinova A. S., Yakushova N. D., Georgieva A. Ts., Moshnikov V. A. Experimental Investigation and Modeling of Bio-Sensitive Properties of ZnO/ZnO:Fe Junctions Based on Nanostructured Films Produced by Sol-Gel Technology. Pt. I. Mater. Sci. Technol. 2016, vol. 24 (2), pp. 77–91.

12. Dimitrov D. Tz., Krasteva L. K., Lyutov L. G., Pronin I. A., Ivanova I. A., Kaneva N. V., Papazova K. I., Averin I. A., Bojinova A. S., Yakushova N. D., Georgieva A. Ts., Moshnikov V. A. Experimental Investigation and Modeling of Bio-Sensitive Properties of ZnO/ZnO:Fe Junctions Based on Nanostructured Films Produced by Sol-Gel Technology. Pt. II. Mater. Sci. Technol. 2016, vol. 24 (3), pp. 127–142.

13. Hsueh T.-J., Hsu C.-L. Fabrication of Gas Sensing Devices with ZnO Nanostructure by the Low-Temperature Oxidation of Zinc Particles. Sens. Actuators B. 2008, vol. 131 (2), pp. 572–576. doi: 10.1016/j.snb.2007.12.045

14. Stilbans L. S. *Fizika poluprovodnikov* [Semiconductor Physics]. 1st ed. Moscow, Sovetskoe radio, 1967, 451 p. (In Russ.)

15. Kaneva N., Stefanov B., Dimitrov D., Dushkin C. Photocatalytic Degradation of Methylene Blue by ZnO Photocatalyst Doped with Nickel. Ann. Univ. Sofia (Fac. Chim.) 2011, vol. 102/103, pp. 293–304.

16. Takata M., Tsubone D., Yanagida H. Dependence of Electrical Conductivity of ZnO on Degree of Sintering. J. Am. Ceram. Soc. 1976, vol. 59 (1–2), pp. 4–8. doi: 10.1111/j.1151-2916.1976.tb09374.x

17. Gopel W. Solid-State Chemical Sensors: Atomistic Models and Research Trends. 1989, vol. 16 (1–2), pp. 167–193. doi: 10.1016/0250-6874(89)80015-0

18. Dimitrov D. Tz., Anastasova S. Y., Dushkin C. D. Oxygen Sensing Junctions Based on Yttria Stabilized Zirconia with Platinum Nanoparticles. Rev. Sci. Instrum. 2006, vol. 77, pp. 0561081–0561083. doi: 10.1063/1.2202925

19. Ri S., Hamano K., Nakagawa Z. Debye Length and Gas Sensor Mechanism of Undoped and Sm₂O₃-Doped ZnO Ceramics. Ceram. Soc. Jpn. 1986, vol. 94, pp. 419–424. doi: 10.2109/jcersj1950.94.1088_419

Information about the author

Dimitre Tz. Dimitrov, PhD (Eng.) (1998), Associate Professor of the Department of Inorganic Chemistry at the Sofia University St. Kliment Ohridski, Bulgaria and head of the Laboratory of Nanoparticle Science and Technology there. He is the author of 53 scientific publications. Area of expertise: photocatalysis; sensors and biosensors. Address: Sofia University St. Kliment Ohridski, 15 Tsar Osvoboditel Blvd., Sofia 1504, Bulgaria
E-mail: nhddt@chem.uni-sofia.bg; dimitrov2001@yahoo.com
<https://orcid.org/0000-0001-5451-1189>

Determination of Ethanol Content in Fuels with Phononic Crystal Sensor

N. V. Mukhin^{1✉}, A. Oseev², M. M. Kutia¹, E. S. Borodacheva¹, P. G. Korolev³

¹Otto-von-Guericke-University Magdeburg, Magdeburg, Germany

²FEMTO-ST Institute, Université de Franche-Comté, Besançon, France

³Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russia

✉ nikolay.mukhin@ovgu.de

Abstract

Introduction. In-line analysis of ethanol content in gasoline blends is currently one of the urgent needs of fuel industry. Developing safe and secure approaches is critical for real applications. A phononic crystal sensor have been introduced as an innovative approach to high performance gasoline sensing. Distinguishing feature of proposed sensor is the absence of any electrical contact with analysed gasoline blend, which allows the use of sensors directly in pipelines without the risk of explosion in an emergency.

Aim. Investigation of the possibilities of using phononic sensor structures to determine the ethanol content in liquid hydrocarbons.

Materials and methods. A theoretical analysis of sensor structure was carried out on the basis of numerical simulation using COMSOL Multiphysics software. For measurement, substances of ordinary gasoline and gasoline 63–80 with ethanol concentrations in the range of 1–10 % by volume in increments of 2 % were prepared. The phononic crystal sensor was designed as a stainless steel plate with cylindrical holes and a resonant cavity, formed as a running across the wave propagation path slit between two lattices.

Results. In-line analysis of measuring the concentration of ethanol in alcohol-containing fuels on a phononic crystal structure with a resonant cavity was carried out. Using the Agilent4395A admittance meter, the transmission spectra of longitudinal acoustic waves through the gasoline-filled sensor structure with were obtained. The non-linear correlation between the composition and the speed of sound of the blend is presented in the article is due to the ability to reduce the speed of sound of the mixture with an increase in ethanol concentration in the range of 0–10 % by volume.

Conclusion. A measurement structure on the basis of phononic crystal was created. The measurements of various gasoline-ethanol mixtures show that the sensor has significant sensitivity (0.91 kHz/ms^{-1}) with quality factor of 200) to distinguish between regular fuels, gasoline based blends and the presence of additives in standard fuels. The sensor has prospects for in-line analyzes the composition of liquid hydrocarbons.

Key words: gasoline sensor, petroleum sensor, phononic crystal, ultrasonic sensor, ethanol, gasoline

For citation: Mukhin N. V., Oseev A., Kutia M. M., Borodacheva E. S., Korolev P. G. Determination of Ethanol Content in Fuels with Phononic Crystal Sensor. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 5, pp. 107–115. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-107-115

Acknowledgements. The support by the German Research Foundation under grant LU 605/16-1 and by the grant of The Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project Goszadanie № 3.3990.2017/4.6).

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 15.09.2019; accepted 01.11.2019; published online 29.11.2019

Introduction. Nowadays, ethanol containing gasoline is widely utilized around the world replacing clear fossil petroleum fuels. Originally gasoline is obtained as a derivative product after oil distillation at the temperature of 60...120 °C (known as still gasoline). It has a sufficiently low octane number



that results in the impossibility of its use as a fuel in modern engines. In order to increase the octane number, various additives such as aromatic hydrocarbons and alcohols became widespread in recent decades [1]. Ethanol is currently one of the most popular additives widely utilized in bio-fuels. It increases the octane number and improves the combustion process. In Brazil since the 1930s, a gasoline with ethanol content of 2–8 % became widespread. Nowadays, there is the E85 brand with ethanol content of 85 % in Sweden and Finland [2].

The usage of ethanol in substandard fuels on the other hand requires a compatibility of the engine. The utilization of ethanol blended gasoline in motors that are not designed to operate with fuels containing high concentrations of alcohol can lead to undesirable effects and can cause a rapid engine wear, decrease its efficiency and a service lifetime. Moreover, due to the incomplete oxidation of the combustible mixture, an increase of environment pollution with CO_2 , CO and other emissions can be expected.

The engines with different features require various kinds of fuel. In order to achieve optimal technical and operational results of the petrol engine, it is necessary to control the fuel with respect to content of ethanol. Currently, permanent works are carried out to improve the characteristics of gasoline engines to operate on different mixtures of ethanol and gasoline [1–3]. One of the promising directions in current research field is the development of engines that can operate on pure gasoline, pure ethanol or on a mixture of petrol and ethanol in any proportions (so-called Flex-fuel engines). The optimal ratio of the ethanol content in gasoline was previously discussed and estimated [4–6].

At the present time, a large number of techniques for gasoline and gasoline-ethanol mixtures analysis are developed. Several of them allow the determination of their composition [7] but they are inapplicable for conducting an in-line analysis. Prasad et al. [8] demonstrated the analysis possibility of combining the gas chromatography with Fourier transform infrared spectroscopy which specifies advantages and disadvantages of these methods. Additionally, there are some straight forward methods [9] where the determination of ethanol content was carried out by means of the viscosity measurement of a mixture. Also, there are ways to make express analysis of the ethanol content in gasoline. One of the approaches shown by Pereira [10] to test the gasoline samples injected into the sensor working area using the batch

injection by means of a gold electrode. An impact of ethanol concentration on a fuel mixture can also be seen from the distillation curves, as shown in [11]. That is an example of a fairly accurate analysis of the ethanol content in gasoline-ethanol mixtures, but it is cumbersome and time consuming. The determination of ethanol concentration in gasoline-ethanol blends is an important task that leads to the development of different techniques and sensors. Nowadays, the application of acoustic metamaterials for liquid sensor purpose, so called phononic crystal sensors, was proven to be an innovative approach demonstrating certain advantages [12–15]. It allows conducting the analysis with only acoustical coupling to the fuel. In comparison to impedance spectroscopy methods [16, 17], in current approach the analysing gasoline is not part of an electrical circuit. This feature allows minimizing the explosion risk in an emergency case and affords to apply such sensors for in-line analysis directly in pipelines without any danger. The method itself is based on analysis of volumetric properties of fluids, such as speed of sound and density. The measuring system provides integral information about analyte volumetric properties that reflect the intermolecular interaction of complex liquid mixtures.

Materials and Methods. The sensor experimental verification was completed with following substances. Gasoline 63–80 and Ethanol 99.5 % were obtained from Carl Roth GmbH and Sigma-Aldrich Chemie GmbH. Gasoline E-5, Gasoline E-10 and Gasoline V-Power were purchased from the local Shell gasoline station as a regular fuel. The measured probes were prepared from regular gasoline and 63–80 fraction of gasoline (gasoline 63–80) with ethanol concentrations in range 0–10 % by volume with increment of 2 %.

The phononic crystal sensor is performed as a periodically structured two-dimensional arrangement. The structure scatters completed as cylindrical scatters (holes) structured in the stainless steel slab. The resonant cavity is formed as a running across the wave propagation path slit between two lattices, Fig. 1, *a*. The lattice constant of the periodical structure is 3.0 mm, the thickness of the slab is 15 mm. Cylindrical scatters have a diameter of 1.8 mm, and the resonant cavity has a width of 1.5 mm.

Overall phononic crystal sensor layout as well as parameters and dimensions have been defined upon numerical simulations. A robust design of the sensor, including shape and materials were optimized assuming industrial applications. In addition, for practical

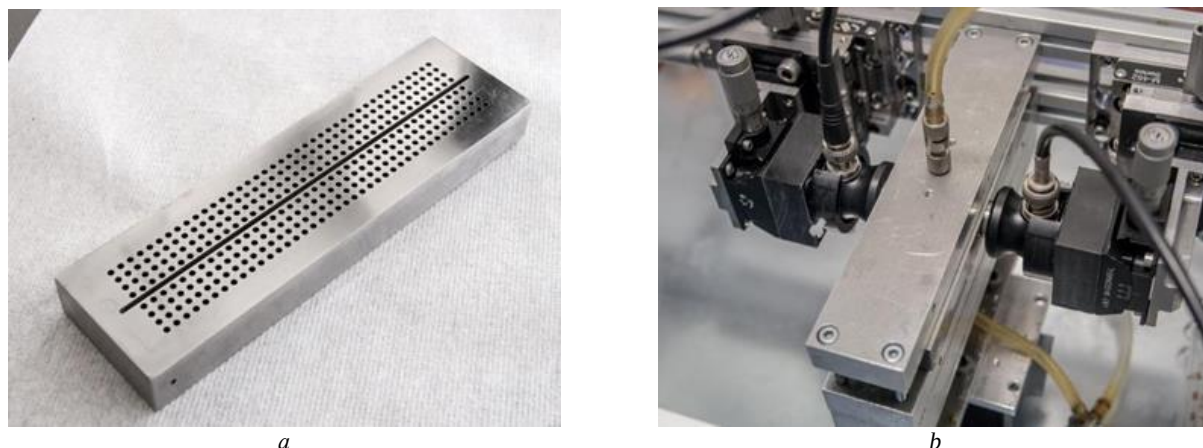


Fig. 1. The experimental setup: *a* – the phononic crystal sensor arrangement; *b* – and measurement experimental setup

reasons, the structure is designed to the wavelength that corresponds to the probing frequency around 1 MHz because of a vast variety of external ultrasonic transducers that can be utilized for the structure probing.

The experimental setup and the phononic crystal sensor are demonstrated in Fig. 1.

The coupling of the phononic crystal sensor to the external measuring circuit is performed only acoustically with a help of external ultrasonic transducers. Panametrics V103-RB clamp-on contact piezoelectric transducers with central frequency of 1.0 MHz have been brought into contact with the sensor utilizing glycerol as a coupling agent (Fig. 1, *b*). Transducers excite and receive longitudinal acoustic waves orthogonally to the scatter's axis and resonant cavity. The analysed liquid fills the structure scatters (holes) and a slit cavity. The sensor is an in-line part of a fluidic system that operates in a circle with analysing liquid, Fig. 1, *b*. The measurement scheme does not include any matching circuits; hence, acoustically coupled ultrasonic transducers are directly connected with coaxial cables to a network analyser. The S-parameter measurements of the PnC sensor filled with analysing fuel were completed with Agilent4395A network analyser together with S-parameter extension Agilent 87511A (100 kHz...500 MHz).

Theory. Phononic crystal sensor utilizing resonant cavity is well known and its basics and applications are well described [13] including gasoline properties determination [12]. Therefore, we used the same design and experimental setup as described in [12] since rheological properties of examined blends are very close. Spectral parameters and expected frequency range of resonances have been determined on the basis of numerical simulation performed with COMSOL™ Multiphysics. The 2D computational domain has been used. We studied both arrangements with finite dimen-

sions along and across acoustic wave propagation and the case with the infinitely long (periodic super-cell) domain in across direction, as well.

Transmission has been computed as the ratio of displacement induced by the incident on the slab acoustic wave and displacement on the opposed side of the slab induced by transmitted wave. The overall transmission has been computed for the frequency range 1.0...1.2 MHz covering the range of expected resonances. The 5 kHz frequency step has been chosen. The liquid domain is represented by the model liquid having rheological properties (density and speed of sound) similar to the low temperature fraction of gasoline (clear gasoline). Computed transmissions corresponding to two different speeds of sound are shown in Fig. 2.

The simulation has been performed for the structure filled with four different model liquids having the same density and different speeds of sound. The density of both liquids was 750 kg/m^3 . The speed of sound was set as 1080, 1100, 1120 and 1140 m/s respectively. The speed of sound in range 1080...1100 m/s correspond to known data for the low temperature gasoline fraction [18, 19] and the

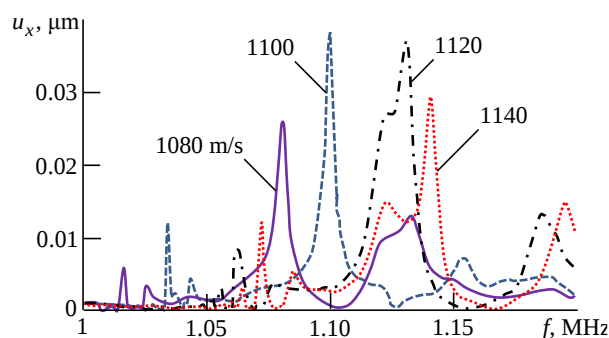


Fig. 2. Computed transmission spectrum for model liquids equivalent to gasoline

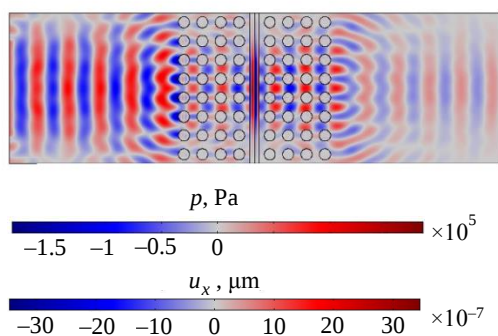


Fig. 3. Displacement and pressure distribution in phononic crystal sensor structure. Liquid domain density 750 kg/m^3 , speed of sound 1080 m/s

higher values ($1120 \dots 1140 \text{ m/s}$) are the expected values for a regular gasoline.

The transmission spectra of the PnC sensor filled with equivalent to gasoline liquids provide several well-distinguishing transmission peaks. The variation of speed of sound in the liquid domain significantly affects their position. The shift of transmission peak to lower frequencies for the liquid with lower speed of sound indicates the involvement of the liquid analyte filling the structure. For lower speed of sound liquids (1080 and 1100 m/s) the transmission maximum is rather narrow and well-isolated. Increase of speed of sound of liquid domain shifts the transmission peak to a higher frequency considerably broadening in case of liquid with 1120 m/s speed of sound and splitting to two separate coupled transmission maximums with 1140 m/s . Observed effect can be associated with coupling of transmission modes of liquid cavity and phononic structure separately. In order to get more insides on the transmission behavior of the phononic structure filled with equivalent to gasoline liquid the displacement and a pressure patterns in the structure were analyzed. The structure

displacement and pressure distribution obtained at the frequency of maximum transmission for liquid with speed of sound 1080 m/s is shown in Fig. 3.

Shown in Fig. 3 displacement pattern and pressure distribution illustrate the phenomenon behind the transmission peak. An incident from left to right acoustic wave passes through the phononic structure at the frequency of peak transmission. One can see well defined pressure resonance pattern inside the slit cavity that explains the direct speed of sound dependency.

Increase of speed of sound of the liquid domain causes transmission maximum broadening with further separation into two coupled peaks (Fig. 2, speed of sound 1140 m/s). That phenomenon can be vividly explained by analysis of displacement and pressure distribution at two separated maximums appearing with liquid speed of sound 1140 m/s , Fig. 4.

The observed on Fig. 4 displacement and pressure patterns demonstrate splitting of resonant cavity mode and phononic structure transmission mode into two separate frequencies. Fig. 4, *a* shows the appearance of structure cavity mode at frequency 1.124 MHz , but the transmission through the periodical arrangement of holes is rather weak. On the other hand, for the frequency 1.142 MHz the transmission through phononic structure is more pronounced but it does not coincide with the cavity mode resulting reduction and broadening of transmission maximum. That is an unwanted effect that decreases the sensor resolution that makes it necessary to consider this effect and adjust the sensor for a certain speed of sound range where the effect is avoided.

Results. Initial investigations were conducted in a way to determine the ethanol presence in different concentrations in low temperature gasoline fraction with the use of the developed PnC sensor. For that reason, the gasoline 63–80 probes were mixed with

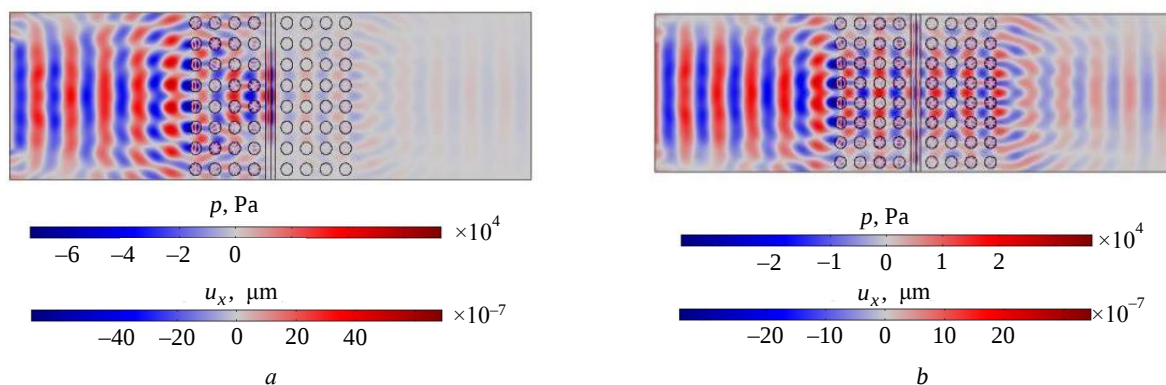


Fig. 4. Displacement and pressure distribution for the phononic structure filled with analogous to gasoline liquid (density 750 kg/m^3 , speed of sound 1140 m/s) at frequencies 1.124 MHz (*a*) and 1.142 MHz (*b*)

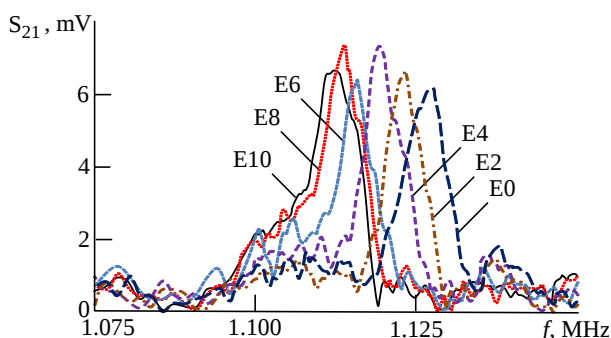


Fig. 5. Measured S_{21} – parameter (transmission) of the PnC sensor filled with the gasoline-ethanol mixture in concentrations range of 0–10 % by weight

ethanol in a weight concentrations range of 0–10 % with increment of 2 % were measured.

The dependence of sensor S_{21} – parameter magnitude response that is demonstrated in Fig. 5 shows that the shift of the peaks is observed in the selected area depending on the ethanol content in the solution. With an increase of ethanol concentration, peaks gradually shift towards the region of lower frequencies.

Nowadays, most of the fuels contain additives in concentration up to 30 %; for example, aromatic components. Following experimental investigations were conducted in order to receive an experimental verification of the sensor frequency spectrum behavior for different ethanol concentrations in a gasoline mixture containing ethylbenzene as an aromatic additive. As it can be seen in Fig. 6, the experimental results confirm previous findings where increase of ethanol concentration causes a gradual shift of the transmission maximum to lower frequency region. The experiment was conducted utilizing mixtures of Gasoline 63–80 (78 %) and Ethylbenzene (22 %) with a variable concentration of ethanol containing 0, 5 and 10 % of ethanol. The content of ethylbenzene increases the speed of sound of the multicomponent gasoline mixture that shifts the peaks of maximum

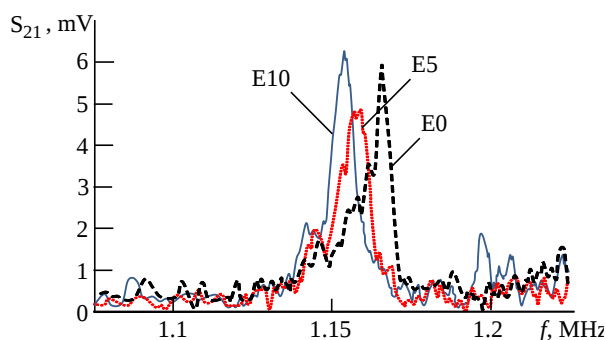


Fig. 6. Measured S_{21} – parameter (transmission) of the PnC sensor filled with the gasoline-ethylbenzene-ethanol mixture in a concentrations range of ethanol 0, 5 and 10 % by weight

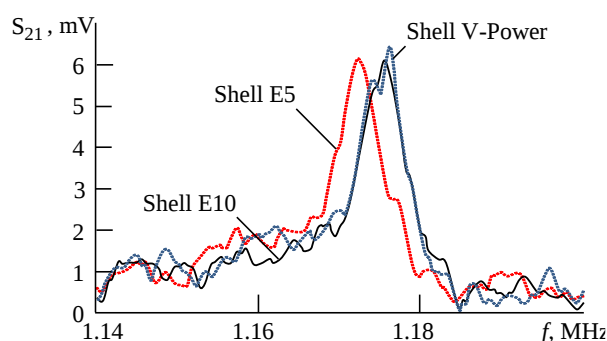


Fig. 7. Measured S_{21} – parameter (transmission) of the PnC sensor filled with gasoline-ethanol mixtures and regular gasoline E5, E10 and VP

transmission in a higher frequency range in comparison to light gasoline fraction experiment Fig. 5. An increase of ethanol concentration leads to shifting the peaks towards lower frequencies (Fig. 6) in the same way as it was observed in previous experiment.

In a similar manner several experiments were carried out using regular Gasoline E5, E10 and VP purchased from local gasoline station. The results of experimental investigations are demonstrated in Fig. 7. The representation of the sensor response as a Nyquist diagram allows obtaining more distinct information from measured regular fuels (see Fig. 8).

The demonstrated in Fig. 8 Nyquist plot shows the data in a frequency range of 1.17...1.18 MHz, omitting the higher and lower frequency information in order to make the plot clearer in a frequency range where the dependence on different gasolines is more pronounced. For the case where in magnitude measurements the dependences for E10 and V-power gasoline almost overlap, the Nyquist plot shows significant distinguishability.

Referring to magnitude sensor response Fig. 7, it can be observed that the sensor transmission peak merges two transmission maximums in most cases. That effect is more pronounced for Shell V-power

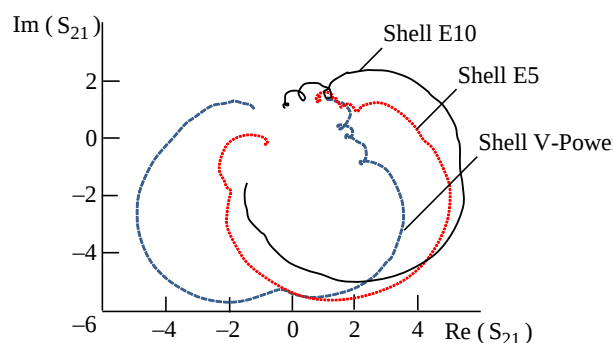


Fig. 8. Nyquist plot of measured S_{21} – parameter (transmission) of the PnC sensor filled with regular gasoline E5, E10 and V-power

gasoline. The effect of transmission double maximum origin is also reflected in Nyquist plot as an interruption of continuous phase change (observed as a bending of curve semicircle on Nyquist plot). Observation of coupled transmission maximums can be explained as an overlapping of separate transmission modes originated by the liquid cavity and phononic structure. The same effect of coupled transmission maximums was also observed theoretically and was shown in Fig. 2 and Fig. 4, *a, b*.

Due to the influence of aromatic hydrocarbons and to the fact that the composition of regular gasoline is much broader and contains various fractions, the peak of maximum transmission is shifted to higher frequencies as it was observed with respect to similar measurements for a narrow low temperature fraction. Additionally, regular gasoline can contain up to 30 % of aromatic additives that have a considerably higher speed of sound than original gasoline. Their presence in a fuel causes an increase of speed of sound of the whole blend. As it can be seen in Fig. 7 and Fig. 8, experimental results demonstrate that the transmission maximum of regular gasoline with a higher ethanol concentration has higher frequency that contradicts to previous findings. We assume that these results can be explained by the variation of composition of E5 and E10 gasolines not only in terms of ethanol content. Presumably, we can conclude that E10 regular gasoline contains more high speed of sound components (such as aromatic additives and others) than E5. Such variation of the hydrocarbon's composition can diminish the expected downshift of transmission peak caused by increased ethanol concentration. This conclusion can be supported with additional experimental investigation with two different blends. One of them is regular E5 gasoline, which presumably has 5 % of ethanol concentration, and another is the same E5 mixed with additional 5 % of ethanol. The idea behind the experiment is to keep constant the composition of the initial fuel and observe only the ethanol influence. Experimental results are demonstrated in Fig. 9.

The obtained experimental results confirm previous findings; the increase of ethanol concentration shifts the transmission maximum to a lower frequency range as it was observed in previous experiments where the composition of gasoline in the mixture was kept constant.

Discussion. Velocities of sound in hydrocarbon components and their mixtures were previously investigated in [20, 21] showing enough agreement

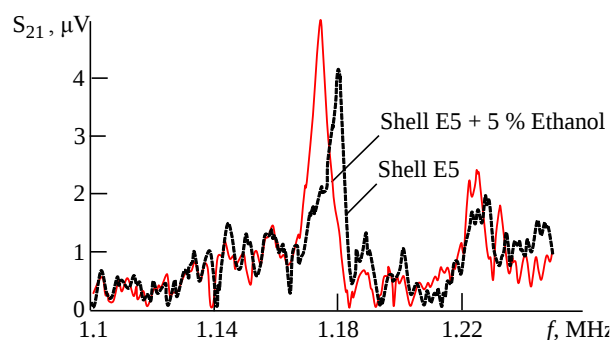


Fig. 9. Measured S_{21} – parameter (transmission) of the PnC sensor filled with regular gasoline E5 and mixture that contain 95 % of regular gasoline E5 and 5 % of ethanol by weight

between hydrocarbons liquid mixture composition and speed of sound of their constituents. Predictable reflection of multicomponent composition of hydrocarbons mixtures in velocity of sound provided platform for applying this method for more sophisticated analyses of thermodynamic properties of liquid mixtures [22–27] that in most cases is hardly completed with alternative methods. In adiabatic liquid systems the isentropic compressibility is directly related to the speed of sound [28] that became a convenient method to study molecular interactions occurring in liquid mixtures. Compressibility as a measure of relative volume change under external pressure depends on thermodynamic properties of liquid mixture [29]. The difference between measured and adiabatic compressibility provides an excess compressibility that reflects the interaction between mixture constituents. The sign of excess compressibility shows how strong are the intermolecular interactions in current liquid mixture. For binary mixtures a negative excess compressibility defines a preliminary attractive intermolecular interaction and the positive excess compressibility on the other hand advocates to an establishment of a less “rigid” molecular structure [29, 30]. The investigation of the excess compressibility or excess thermodynamic properties of liquid mixtures in general is a widely utilized approach allowing obtaining the information from intermolecular interactions in multicomponent liquid systems.

The observed behavior of ethanol–gasoline mixtures demonstrates a non-linear correlation between composition and speed of sound of the blend. Even though ethanol has a higher speed of sound than gasoline, the increase of its concentration (in range 0–10 % by volume) causes lowering of mixture speed of sound that is observed as a shift of transmission maximum to a lower frequency region. This behavior of gasoline-ethanol blends was already

previously observed [13]. Due to alcohol contains a special functional group R–OH, its presence leads to a very big difference in the ability to attract and retain electron pairs between atoms of oxygen, carbon and hydrogen that are included in the hydroxyl group of alcohol molecules. C–O and O–H interconnections have significant polar properties: an oxygen atom has an unshared electron pair and a partial negative charge that leads to occurrence of a significant positive charge on a hydrogen atom inside hydroxyl group. The charge difference between a hydrogen atom of a hydroxyl group and other hydrogen atoms gives the opportunity to form intermolecular hydrogen bonds and stable clusters of molecules as a result. The mechanism of formation and interaction of clusters formed with ethanol and other liquids can lead to abnormal fluctuations [31, 32] that was observed in current work.

Conclusion. Current contribution describes the development and experimental verification of the phononic crystal based in-line fuel sensor. The distinguishing feature of demonstrated sensor is its conceptual difference from those that are currently utilized. The application of acoustic metamaterials, so called phononic crystals, allows build conceptually

different measuring scheme that does not require the fuel to be a part of the electrical circuit (as it is in impedance – based methods); hence, the gasoline is only acoustically coupled. The presented sensor design and its theoretical investigation demonstrate an ability of the sensitive integral analysis of complex hydrocarbon mixtures. Numerical calculation results underline the necessity for the phononic structure to be optimized for certain speed of sound range of analyzing liquid to keep the sensor high resolution. The experimental investigations confirmed theoretical predictions. The speed of sound variation reflects the fuel composition and indicate the existence of intermolecular interactions causing non-linear response. Demonstrated results of the in-line ethanol concentration analysis provide distinguishing and explainable results. The measurements of various gasoline-ethanol mixtures demonstrate that the sensor has a significant sensitivity to distinguish regular fuels, gasoline – based blends and presence of additives in standard fuels. The demonstrated for a first time results of measuring with phononic crystal sensor the regular fuels and ethanol containing gasoline can be valuable for applications in a fuel industry.

Authors' contribution

Nikolay V. Mukhin, numerical calculation of phononic crystals; comparison of theory with experiment; preparation of the final manuscript.

Aleksandr Oseev, measuring setup preparation; writing the basic draft; data validation.

Mykhailo M. Kutia, gasoline-ethanol mixtures preparation and experimental measurements.

Ekaterina S. Borodacheva, design and data processing.

Pavel G. Korolev, measuring system control.

References

1. Costa R. C., Sodré J. R. Hydrous Ethanol vs. Gasoline-Ethanol Blend: Engine Performance and Emissions. *Fuel*. 2010, vol. 89, iss. 2, pp. 287–293. doi: 10.1016/j.fuel.2009.06.017
2. Rasskazchikova T. V., Kapustin V. M., Karpov S. A. Ethanol as High-Octane Additive to Automotive Gasolines. Production and Use in Russia and Abroad. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2004, vol. 40, iss. 4, pp. 203–210. doi: 10.1023/B:CAFO.0000041215.14876.ce
3. Celik M. B. Experimental Determination of Suitable Ethanol-Gasoline Blend Rate at High Compression Ratio for Gasoline Engine. *Applied Thermal Engineering*. 2008, vol. 28, iss. 5–6, pp. 396–404, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.10.028
4. Delgado R. C. O. B., Araujo A. S., Fernandes V. J. Properties of Brazilian Gasoline Mixed with Hydrated Ethanol for Flex-Fuel Technology. *Fuel Processing Technology*. 2007, vol. 88, no. 4, pp. 365–368, doi: 10.1016/j.fuproc.2006.10.010
5. Machado G. B., Barros J. E. M., Braga S. L., Braga C. V. M., Oliveira E. J. de, da Silva A. H. M. d. F. T., Carvalho L. d. O. Investigations on Surrogate Fuels for High-Octane Oxygenated Gasolines. *Fuel*. 2011, vol. 90, iss. 2, pp. 640–646. doi: 10.1016/j.fuel.2010.10.024
6. Melo T. C. C. d., Machado G. B., Belchior C. R. P., Colaço M. J., Barros J. E. M., Oliveira E. J. de, Oliveira D. G. de. Hydrous Ethanol-Gasoline Blends – Combustion and Emission Investigations on a Flex-Fuel Engine. *Fuel*. 2012, vol. 97, pp. 796–804. doi: 10.1016/j.fuel.2012.03.018
7. Ozcan M., Akman S. Determination of Cu, Co and Pb in Gasoline by Electrothermal Atomic Absorption Spectrometry Using Aqueous Standard Addition in Gasoline-Ethanol-Water Three-Component System. *Spectro-*

chimica Acta, Pt. B: Atomic Spectroscopy. 2005, vol. 60, iss. 3, pp. 399–402. doi: 10.1016/j.sab.2004.12.001

8. Prasad P. R., Rama Rao K. S., Bhuvaneswari K., Praveena N., Srikanth Y. V. V. Determination of Ethanol in Blend Petrol by Gas Chromatography and Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Energy Sources, Pt. A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2008, vol. 30, iss. 16, pp. 1534–1539. doi: 10.1080/15567030701258444

9. Sastry G. S., Prasad P. R., Bhuvaneswari K. Determination of Alcohol in Petrol-Alcohol Mixtures. Indian Journal of Chemical Technology. 2004, vol. 11, pp. 323–325.

10. Pereira P. F., Marra M. C., Munoz R. A. A., Richter E. M. Fast Batch Injection Analysis System for on-Site Determination of Ethanol in Gasohol and Fuel Ethanol. Talanta, 2012, vol. 90, pp. 99–102. doi: 10.1016/j.talanta.2012.01.004

11. Mendes G., Aleme H. G., Barbeira P. J. S. Determination of Octane Numbers in Gasoline by Distillation Curves and Partial Least Squares Regression. Fuel, 2012, vol. 97, pp. 131–136. doi: 10.1016/j.fuel.2012.01.058

12. Lucklum R., Ke M., Zubtsov M. Two-Dimensional Phononic Crystal Sensor Based on a Cavity Mode. Sensors and Actuators B: Chemical. 2012, vol. 171–172, pp. 271–277. doi:10.1016/j.snb.2012.03.063

13. Oseev A., Zubtsov M., Lucklum R. Gasoline Properties Determination with Phononic Crystal Cavity Sensor. Sensors and Actuators B: Chemical. 2013, vol. 189, pp. 208–212. doi: 10.1016/j.snb.2013.03.072

14. Zubtsov M., Lucklum R., Ke M., Oseev A., Grundmann R., Henning B., Hempel U. 2D Phononic Crystal Sensor with Normal Incidence of Sound. Sensors and Actuators A: Physical. 2012, vol. 186, pp. 118–124. doi: 10.1016/j.sna.2012.03.017

15. Schmidt M.-P., Oseev A., Engel C., Brose A., Schmidt B., Hirsch S. Flexible Free-Standing SU-8 Microfluidic Impedance Spectroscopy Sensor for 3-D Molded Interconnect Devices Application. J. Sens. Syst. 2016, vol. 5, pp. 55–61. doi: 10.5194/jsss-5-55-2016

16. Schmidt M.-P., Oseev A., Lucklum R., Zubtsov M., Hirsch S. SAW Based Phononic Crystal Sensor, Technological Challenges and Solutions. Microsyst Technol. 2016, vol. 22, pp. 1593–1599. doi: 10.1007/s00542-015-2781-3

17. Luning Prak D. J., Morris R. E., Cowart J. S., Hamilton L. J., Trulove P. C. Density, Viscosity, Speed of Sound, Bulk Modulus, Surface Tension, and Flash Point of Direct Sugar to Hydrocarbon Diesel (DSH-76) and Binary Mixtures of N-Hexadecane and 2,2,4,6,6-Pentamethylheptane. J. Chem. Eng. Data. 2013, vol. 58, pp. 3536–3544. doi: 10.1021/je400839x

18. Schmidt M.-P., Oseev A., Engel C., Brose A., Aman A., Hirsch S. A Novel Design and Fabrication of Multichannel Microfluidic Impedance Spectroscopy Sensor for Intensive Electromagnetic Environment Application. Procedia Engineering. 2014, vol. 87, pp. 88–91. doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.272

19. Sharma R. K., Gupta A. K. Detection/Estimation of Adulteration in Gasoline and Diesel Using Ultrasonics. In 2007 Intern. Conf. on Industrial and Information Sys-

tems. Peradeniya, Sri Lanka, 09–11 Aug. 2007. Piscataway, IEEE, 2007, pp. 509–512. doi: 10.1109/ICIINF5.2007.4579230

20. Wang Z. N. A. Ultrasonic Velocities in Pure Hydrocarbons and Mixtures. The Journal of the Acoustical Society of America. 1991, vol. 89 (6), pp. 2725–2730.

21. Berryman J. G. Analysis of Ultrasonic Velocities in Hydrocarbon Mixtures. The Journal of the Acoustical Society of America. 1993, vol. 93 (5). doi: 10.1121/1.405865

22. Schmelzer C. E. H., Żwirbła W., Rosenfeld E., Linde B. B. J. Acoustic Investigations of Pseudo-Stable Structures in Aqueous Solutions of Polyethylene Glycols. Journal of Molecular Structure. 2004, vol. 699, pp. 47–51. doi: 10.1016/j.molstruc.2004.04.027

23. French R., Malone P. Phase Equilibria of Ethanol Fuel Blends. Fluid Phase Equilibria. 2005, vol. 228–229, pp. 27–40. doi:10.1016/j.fluid.2004.09.012

24. Dharmalingam K., Ramachandran K., Sivagurunathan P. Hydrogen bonding interaction between ethyl methacrylate and alcohols in non-polar solvents: An FTIR study. Main Group Chemistry. 2005, no. 4, pp. 241–246. doi:10.1080/10241220600649745.

25. Tôrres R. B., Marchiore A. C. M., Volpe P. L. O. Volumetric Properties of Binary Mixtures of (water+organic solvents) at Temperatures between $T=288.15$ K and $T=303.15$ K at $p=0.1$ MPa. The Journal of Chemical Thermodynamics. 2006, vol. 38, pp. 526–541. doi: 10.1016/j.jct.2005.07.012

26. Mmereki B. T., Oathotse I., Ddamba W. A. A. Ultrasonic Speeds and Isentropic Compressibilities of {difurylmethane+(C₁–C₆) *n*-alkanol} Binary Mixtures at $T=298.15$ K. The Journal of Chemical Thermodynamics. 2010, vol. 42, pp. 1346–1351. doi: 10.1016/j.jct.2010.05.016

27. Gliński J. Determination of the Conditional Association Constants from the Sound Velocity Data in Binary Liquid Mixtures. The Journal of Chemical Physics. 2003, vol. 118, pp. 2301–2307. doi: 10.1063/1.1534579

28. Shukla R. K., Dixit S. N., Jain P., Mishra P., Sharma S. Ultrasonic Velocity and Isentropic Compressibility of Binary Fluid Mixtures at 298.15 K. Orbital. 2010, vol. 2, no. 4.

29. Sarkar L., Roy M. N. Studies on Liquid-Liquid Interactions of Some Ternary Mixtures by Density, Viscosity, Ultrasonic Speed and Refractive Index Measurements. Thermochimica Acta. 2009, vol. 496, pp. 124–128. doi: 10.1016/j.tca.2009.07.011

30. Aliotta F., Gapiński J., Pochylski M., Ponterio R. C., Saija F., Salvato G. Excess Compressibility in Binary Liquid Mixtures. The Journal of Chemical Physics. 2007, vol. 126, 224508. doi: 10.1063/1.2745292

31. Chechko V. E., Lokotosh T. V., Malomuzh N. P., Zaremba V. G., Gotsul'sky V. Y. Clusterization and Anomalies of Fluctuations in Water-Alcohol Solutions of Low Concentrations. Journal of Physical Studies. 2003, vol. 7, pp. 175–183.

32. Allison S. K., Fox J. P., Hargreaves R., Bates S. P. Clustering and Microimmiscibility in Alcohol-Water Mixtures: Evidence from Molecular-Dynamics Simulations. Phys. Rev. B. 2005, vol. 71. doi: 10.1103/PhysRevB.71.024201

Information about the authors

Nikolay V. Mukhin, Ph.D. (Eng.) (2013), Researcher of Department of Sensorics of Institute of Micro and Sensor Systems (IMOS), Otto-von-Guericke-University Magdeburg, Germany. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: study of thin-film ferroelectrics; the development of acoustic metamaterials and sensors.

Address: Otto-von-Guericke-University Magdeburg, Universitaetsplatz 2, Magdeburg 39106, Germany

E-mail: nikolay.mukhin@ovgu.de

<https://orcid.org/0000-0002-8709-6361>

Oseev Aleksandr, Ph.D. (2017), he is working in FEMTO-ST Institute, Université de Bourgogne Franche-Comté. The author of 28 scientific publications. Area of expertise: fluidic sensors, more specifically, phononic crystal based sensors, microacoustic sensors, microfluidic sensor platforms.

Address: 15B Av. des Montboucons, Besançon 25030, France

E-mail: aleksandar.oseev@ovgu.de

<https://orcid.org/0000-0002-8884-6945>

Mykhailo M. Kutia, post-graduate student of Otto-von-Guericke-University Magdeburg, Germany since 2016. The author of 12 scientific publications. Area of expertise: modeling of fluid filtration in underground reservoirs and creation of sensory systems for online determination of physical properties of mixtures of hydrocarbons.

Address: Otto-von-Guericke-University Magdeburg, Universitaetsplatz 2, Magdeburg 39106, Germany

E-mail: mykhailo.kutia@ovgu.de

<https://orcid.org/0000-0001-8766-1001>

Ekaterina S. Borodacheva, Master student of Otto-von-Guericke-University Magdeburg, Germany. The author of 2 scientific publications. Area of expertise: optimization, study of phononic sensors.

Address: Otto-von-Guericke-University Magdeburg, Universitaetsplatz 2, Magdeburg 39106, Germany

E-mail: katrinborodacheva@gmail.com

Pavel G. Korolev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Information-Measuring Systems and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 14 scientific publications. Area of expertise: metrological serviceability of information-measuring systems.

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

E-mail: pgkorolev@etu.ru

<http://orcid.org/0000-0002-9054-6351>

Микроакселерометр на поверхностных акустических волнах с кольцевым резонатором на анизотропном материале

Д. П. Лукьянов¹, А. М. Боронахин¹, С. Ю. Шевченко¹, М. А. Хиврич^{2✉}, Т. А. Амиров³

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

²АО "Авро-МКС", Санкт-Петербург, Россия

³Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

✉mariya-khivrich@yandex.ru

Аннотация

Введение. Состояние объектов эксплуатации (например, на железной дороге) контролируется системами диагностики. В их составе используются микроэлектромеханические системы, комплектуемые датчиками ускорения (акселерометрами). В процессе эксплуатации акселерометры подвергаются значительным вибрациям и многократно повторяющимся ударным воздействиям. Это накладывает ограничения на конструкцию и материалы, из которых изготавливаются акселерометры.

Цель работы. Разработка микромеханического акселерометра (ММА) на поверхностных акустических волнах (ПАВ), способного измерять ударные воздействия.

Материалы и методы. Теоретическая часть работы выполнялась с применением математической теории дифференциальных уравнений, теоретической механики, конечно-элементарного анализа и элементов теории ПАВ. В ходе работы применялась математическая обработка в программах MATLAB, Mathcad, Maple, COMSOL Multiphysics, OOFELIE::Multiphysics, ПО Bluehill3, CorelDRAW. Экспериментальные исследования проведены с привлечением напольной автоматизированной испытательной системы INSTRON 5985.

Результаты. Разработана концепция построения и предложена оригинальная конструкция ММА на ПАВ, способного измерять ударные воздействия в сотни g. Разработан чувствительный элемент (ЧЭ) сенсора. Анализ материалов для пластин в составе конструкции ММА на ПАВ показал, что ЧЭ из кварца ST-среза отличается более широким диапазоном измеряемых ускорений и более высоким порогом чувствительности, чем ЧЭ из ниобата лития среза YX-128°. Выработаны требования и исследована возможность повышения порога чувствительности датчика. Сформулированы требования к проектированию и предложена топология встречно-штыревого преобразователя (ВШП) в виде кольцевого резонатора. Предложена оригинальная топология резонатора с неэквидистантным ВШП для учета анизотропии материала чувствительного элемента. Оценены выходные характеристики: порог чувствительности, динамический диапазон, масштабный коэффициент. Предложена методика расчета ММА на ПАВ с кольцевым резонатором на анизотропном материале. ЧЭ ММА такой конструкции имеет высокий порог чувствительности, широкий динамический диапазон и малую поперечную чувствительность.

Заключение. Предложенная методика проектирования ЧЭ твердотельного датчика линейных ускорений позволяет выбрать материал и систему съема измерительной информации в зависимости от технических требований. Благодаря оригинальности конструкторско-технологического решения предложенный акселерометр позволяет проводить измерения в широком диапазоне ударных воздействий.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы, микромеханический акселерометр, чувствительный элемент, поверхностно-акустические волны, встречно-штыревой преобразователь, анизотропный материал

Для цитирования: Микроакселерометр на поверхностных акустических волнах с кольцевым резонатором на анизотропном материале / Д. П. Лукьянов, А. М. Боронахин, С. Ю. Шевченко, М. А. Хиврич, Т. А. Амиров // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 5. С. 116–129. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-116-129

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.09.2019; принята к публикации после рецензирования 14.10.2019; опубликована онлайн 29.11.2019

© Лукьянов Д. П., Боронахин А. М., Шевченко С. Ю., Хиврич М. А., Амиров Т. А., 2019

Microaccelerometer on Surface Acoustic Waves with a Ring Resonator on Anisotropic Material

Dmitry P. Lukyanov¹, Alexander M. Boronakhin¹, Sergey Yu. Shevchenko¹,
Mariya A. Khivrich², Temurmaliq A. Amirov³

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² JSC "Avro-MCS", St Petersburg, Russia

³ Tashkent State Technical University n. a. Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan

✉ mariya-khivrich@yandex.ru

Abstract

Introduction. Diagnostic systems are designed to monitor the condition of operational components (for example, on the railway). It is imperative that micro-electromechanical systems (MEMS) equipped with acceleration sensors (accelerometers) be used as part of measuring diagnostic systems. It is known that accelerometers are operated under increased vibration and repeated shock loads. This imposes a limitation both on the accelerometer design and the properties of materials from which these devices are produced.

Aim. To develop a micromechanical accelerometer (MMA) for surface acoustic waves (SAW), capable of measuring shock effects.

Materials and methods. The theoretical part of the study was carried out using the mathematical theory of differential equations, theoretical mechanics, finite element analysis and elements of SAW theory. In the course of the work, the following methods of mathematical processing were applied: MATLAB, Mathcad, Maple, COM-SOL Multiphysics, OOFELIE: Multiphysics, Bluehill3 software, CorelDRAW. Experimental studies were also conducted using the INSTRON 5985 floor automated test system.

Results. An original design of MMA on a SAW capable of measuring shock effects in hundreds of g was proposed. A sensing element (SE) of the sensor was developed. An analysis of the plate materials for their use as part of the SAW-based MMA design showed that SE from the quartz ST-cut material has a wider range of measured accelerations and a higher sensitivity threshold than SE from the YX-128° cut-off lithium niobate material. Requirements were developed to increase the SE sensitivity threshold. Design requirements were developed, and an interdigital transducer (IDT) topology in the form of a ring resonator was proposed. The following output characteristics were assessed: sensitivity threshold, dynamic range and scale factor. In addition, a procedure was developed for calculating MMA on a SAW with a ring resonator on an anisotropic material. It was found that the developed SE is characterized by a high sensitivity threshold, a wide dynamic range and a low transverse sensitivity.

Conclusion. The technique proposed for designing a sensing element for use in solid-state linear acceleration sensors facilitates, depending on technical requirements, selection of construction materials and sensor design. Due to the originality of the design and engineering solutions, the proposed accelerometer allows measurements to be carried out across a wide range of impact loads.

Key words: microelectromechanical systems, micromechanical accelerometer, sensitive element, surface acoustic waves, interdigital transducer, anisotropic material

For citation: Lukyanov D. P., Boronakhin A. M., Shevchenko S. Yu., Khivrich M. A., Amirov T. A. Microaccelerometer on Surface Acoustic Waves with a Ring Resonator on Anisotropic Material. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 5, pp. 116–129. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-116-129

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

Submitted 16.09.2019; accepted 14.10.2019; published online 29.11.2019

Введение. Последние десятилетия микроэлектромеханические системы (МЭМС) стали неотъемлемой частью современной техники [1–3]. Они применяются как в составе приборов персональной

электроники, так и в тяжелой промышленности, военной технике. МЭМС активно применяются в специальной технике с особыми условиями эксплуатации, в контрольно-измерительной аппара-

Микроакселерометр на поверхностных акустических волнах с кольцевым резонатором на анизотропном материале

Microaccelerometer on Surface Acoustic Waves with a Ring Resonator on Anisotropic Material

туре, например в составе системы диагностики железнодорожного полотна, где необходимо измерять ударные воздействия в сотни g [4–6]. Указанные возможности определяют актуальность проектирования таких приборов.

В результате анализа основных видов МЭМС-датчиков [7–17] сделано заключение, что для микромеханического акселерометра (ММА), способного выдерживать большие перегрузки и измерять высокие ускорения, необходимо выполнение следующих рекомендаций:

- чувствительный элемент (ЧЭ) должен быть жестко закреплен;
- для уменьшения поперечной чувствительности необходимо применять осесимметричные конструкции ЧЭ и равномерное их закрепление;
- для повышения порога чувствительности необходимо нагружать ЧЭ инерционной массой.

Для выполнения указанных рекомендаций предлагается выполнять твердотельный датчик на поверхностных акустических волнах (ПАВ), использующих молекулярную кинетику твердого тела.

Ранее на кафедре лазерных измерительных и навигационных систем (ЛИНС) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) был разработан ММА на ПАВ [18]. Он представлял из себя акселерометр маятникового типа, ЧЭ которого реализован в виде консоли, выполненной из монокристалла кварца ST-среза. ЧЭ жестко закреплялся с одной стороны и нагружался инерционной массой (ИМ) с другой. На противоположных сторонах элемента находились ПАВ-резонаторы.

Обобщенная структурная схема дифференциального ПАВ-акселерометра показана на рис. 1. Она включает ЧЭ 1, который жестко закреплен левым концом и нагружен ИМ m справа. На нем установлены два ПАВ-резонатора 2, включенные в цепи автогенераторов 3. Выходные сигналы автогенераторов подаются на смеситель 4, на выходе которого включены два полосовых фильтра 5, 6.

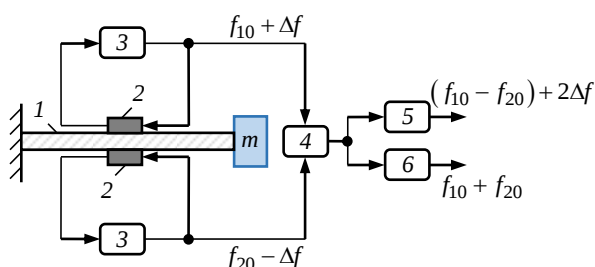


Рис. 1. Структурная схема ПАВ-акселерометра

Fig. 1. Structural diagram of a SAW-accelerometer

Под действием ускорения ЧЭ консольного типа испытывает нагрузку на изгиб. При этом резонансные частоты резонаторов 2 изменяются, что вызывает изменение частот выходных сигналов генераторов 3 на величину Δf , пропорциональную действующему ускорению. Гармонические колебания автогенераторов 3 поступают на смеситель 4, где формируются сигналы суммарной частоты $f_{10} + f_{20}$ и разностной частоты $f_{10} - f_{20} + 2\Delta f$. Разностная частота зависит от значения ускорения, а суммарная может быть использована для уменьшения влияния дестабилизирующих факторов, прежде всего температуры, через канал автоподстройки частот генераторов.

Одним из важнейших критериев, определяющих чувствительность ММА на ПАВ, являются относительные деформации ЧЭ. В случае прямоугольной консоли распределение относительных деформаций по длине ЧЭ при действии ускорения вдоль оси чувствительности датчика является неоднородным, что при несимметричном расположении ПАВ-резонаторов приводит к различной чувствительности плеч дифференциальной схемы и, следовательно, к дополнительным погрешностям. Для уменьшения этих погрешностей предложена консоль треугольной формы [18], относительные деформации которой равномерны.

Вместе с тем, ЧЭ прямоугольной формы отличается существенной чувствительностью к ускорениям, направленным вдоль осей, перпендикулярных измерительной, в то время как ЧЭ с треугольной формой консоли к таким воздействиям практически нечувствителен.

Принимая во внимание указанные свойства, был сделан вывод, что для дальнейших разработок более перспективна консоль треугольной формы, так как она обеспечивает равномерное распределение относительных деформаций в области нанесения ПАВ-резонатора, а также имеет малую поперечную чувствительность датчика. Недостатком такой конструкции является малый динамический диапазон, что не позволяет измерять ударные воздействия.

В 2009 г. русско-немецкой научной группой предложен высокочастотный ПАВ-резонатор в виде протяженного замкнутого в кольцо одноходового резонатора, нанесенного на подложку Z-среза нитрида алюминия [19–21].

В настоящей статье предлагается совместить эти две разработки с целью создания ММА на

ПАВ с кольцевым резонатором на анизотропном материале, способного измерять ударные воздействия в сотни g . Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- выбором конструкции и материала ЧЭ ММА на ПАВ для измерения ударных воздействий;
- анализом внутренних напряжений и распределения относительных деформаций ЧЭ;
- повышением чувствительности за счет использования топологии кольцевого встречно-штыревого преобразователя (КВШП) и нагружения ЧЭ ИМ;
- оценкой динамического диапазона, порога чувствительности, масштабного коэффициента;
- расчетом топологии КВШП для анизотропной подложки и оценкой влияния технологических погрешностей на выходной сигнал;
- анализом особенностей съема выходного сигнала.

На основании решения этих задач предложен ММА на ПАВ с кольцевым резонатором на анизотропном материале (рис. 2). ЧЭ такого ММА представляет собой пластину круглой формы, закрепленную по образующей, на обе стороны которой нанесены ПАВ-резонаторы. Он решает сразу две задачи – равномерное распределение относительных деформаций и разумное использование габаритов элемента [22].

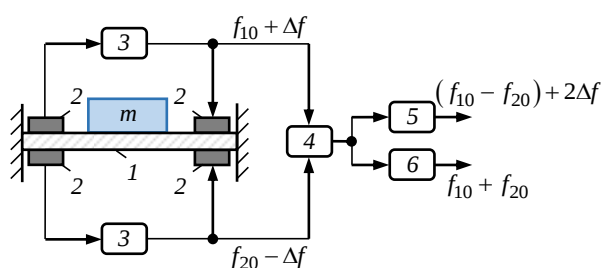


Рис. 2. Структурная схема ММА на ПАВ с кольцевым резонатором

Fig. 2. Structural diagram of the MMA using the SAW with ring resonator

Принцип работы такого акселерометра точно такой же, как у ММА, описанного ранее.

На первом этапе проектирования ММА необходимо оценить возможность применения в качестве материала для чувствительного элемента: кварца ST-среза и ниобата лития среза YX-128°. Будучи материалами для подложек акустоэлектронных устройств, каждый из них обладает своими достоинствами и недостатками. Необходимо исследовать, как эти материалы будут вести себя в роли подвесной конструкции ММА.

Параметры материалов. Характеристиками любого акселерометра являются пороговая чувствительность и динамический диапазон. В ММА на ПАВ эти параметры определяются (в первом приближении) механической частью ЧЭ, в рассматриваемом ММА – круглой пластины, жестко закрепленной по образующей.

Динамический диапазон ММА определяется предельной прочностью механической части ЧЭ. Предполагается, что предложенный ЧЭ будет способен выдерживать большие нагрузки, чем ЧЭ маятников типа [18]. В результате анализа напряженно-деформированного состояния ЧЭ, закрепленного по образующей, определено, что максимальное напряжение зависит от двух переменных: ускорения a и отношения квадрата радиуса пластины R к ее толщине h :

$$\sigma_{\max} = (3/4)\rho a (R^2/h),$$

где ρ – плотность материала.

При выборе габаритов ЧЭ для акселерометра определяющим является проникающая способность акустической волны. ПАВ обладают слабой проникающей способностью около 3λ (λ – длина ПАВ). Предполагая, что ВШП будут располагаться с противоположных сторон ЧЭ, минимальная толщина элемента из кварца должна составлять не менее 7λ . Например, для датчика с размерами не более $10 \times 10 \times 10$ мм необходимо, чтобы соотношение $R_{\max}^2/h_{\min}$ было не более 500 для кварца и 400 для ниобата лития ($R_{\max}$, $h_{\min}$ – максимальный радиус и минимальная толщина пластины соответственно). Все дальнейшие вычисления и графики приведены для значений $R_{\max}^2/h_{\min} = 25, 100, 200$ и 400.

Предельные прочности материалов. ММА на ПАВ сохраняет измерительные возможности вплоть до излома, т. е. диапазон измерений датчика и максимальные перегрузки, которые он выдерживает, совпадают. В результате для оценки динамического диапазона необходимо знать механические возможности ЧЭ – предельную прочность при изгибе, под которой понимается нагрузка, приводящая к разрушению образца.

Для определения предельных прочностей материалов были проведены статические испытания образцов кварца ST-среза и ниобата лития среза YX-128°.

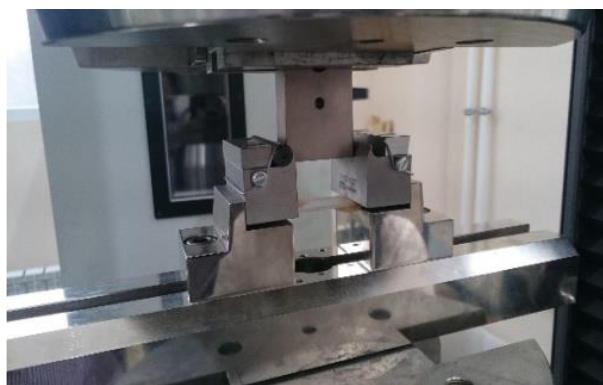


Рис. 3. Экспериментальная установка INSTRON 5985 с испытываемым образцом

Fig. 3. Experimental installation INSTRON 5985 with the testing sampler

На экспериментальной установке INSTRON 5985 устанавливались траверсы с зажимами и обеспечивалась параллельность опорных поверхностей (рис. 3). Образцы пластин кварца ST-среза и ниобата лития среза YX-128° жестко закреплялись зажимами в экспериментальной установке и подвергались механическому воздействию в виде давления "сверху вниз" равномерно распределенной нагрузкой P до разрушения материала (рис. 4). По результатам испытаний была рассчитана предельная прочность материалов: для кварца ST-среза она составила 141.8 МПа, а для ниобата лития среза YX-128° – 106.8 МПа [23–25].

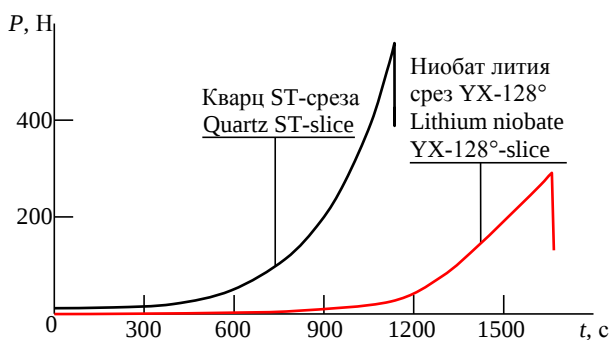


Рис. 4. График подачи нагрузки в эксперименте по определению предельной прочности образцов

Fig. 4. Graph of the load in the experiment to determine the ultimate strength of the samples

Таким образом, при равных условиях эксплуатации, характерных для ЧЭ КВШП (перегрузки в тысячи g , жесткое закрепление ЧЭ по периметру), кварц является более прочным материалом по сравнению с ниобатом лития. Это позволяет заключить, что его использование в качестве материала для ЧЭ акселерометра более рационально.

Порог чувствительности. Порог чувствительности определялся как воздействие, вызыва-

ющее сигнал, в 3 раза превосходящий уровень шумов. При оценке пороговой чувствительности ММА на ПАВ важную роль играют относительные деформации в месте расположения резонатора, с возрастанием которых увеличивается изменение частоты, а следовательно, и выходной сигнал преобразователя. Результаты измерений показали, что для ранее разработанного на кафедре ЛИНС ММА на ПАВ с ЧЭ маятникового типа [18] порог чувствительности составляет 0.21 кГц.

С целью увеличения относительных деформаций, приводящих к повышению порога чувствительности, было решено нагрузить ЧЭ ИМ и провести анализ напряженно-деформированного состояния. Варьируя параметры ИМ и структуры ВШП, можно добиться наибольшей точности измерений, простоты конструкции датчика и необходимого частотного диапазона. Аналитический расчет относительных деформаций – сложная и трудоемкая задача, поэтому для оптимизации было проведено компьютерное моделирование. Кроме того, в процессе проектирования возникает необходимость оценки предельных эксплуатационных характеристик сенсоров. Поскольку к ударопрочности сенсоров на ПАВ предъявляются крайне жесткие требования, ее экспериментальная оценка требует значительных затрат, а в некоторых случаях вовсе не возможна.

Моделирование ММА на ПАВ выполнялось в программном пакете COMSOL Multiphysics. При помощи встроенного редактора геометрии были построены модели, представлявшие собой круглые пластины, жестко закрепленные по образующей, в центре которых помещены ИМ. Модели разбивались на конечные элементы треугольной сеткой (рис. 5, а). Размеры пластин удовлетворяли выбранным ранее соотношениям $R_{\max}^2/h_{\min} = 25, 100; 200; 400$. Расчет проводился для двух видов материалов: кварца ST-среза и ниобата лития среза YX-128°. В процессе моделирования учитывались анизотропные свойства указанных материалов. Инерционная масса представляла собой цилиндр. В качестве материала ИМ был выбран немагнитный тяжелый сплав вольфрам–никель–медь (ВНМ), обладающий следующими характеристиками: высокой плотностью $\rho = 18\,000 \text{ кг/м}^3$, модулем упругости Юнга $E = 350 \text{ ГПа}$, коэффициентом Пуассона $\gamma = 0.29$. Программа позволила смоделировать воздействия различных значений ускорений (рис. 5, б) и расчи-

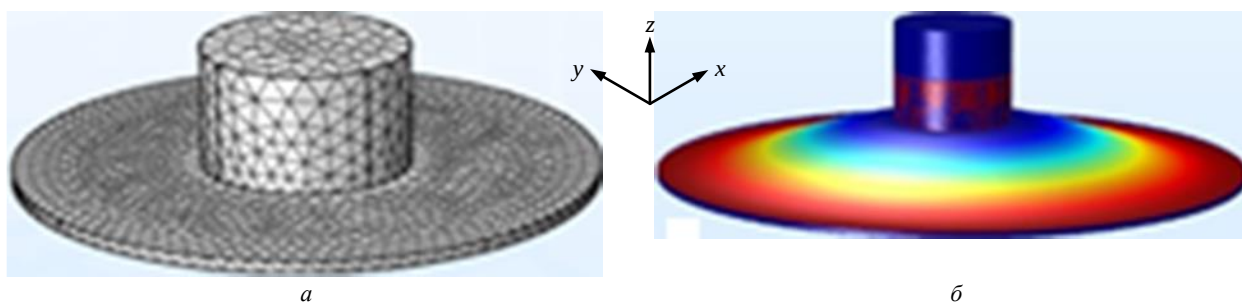


Рис. 5. Модель чувствительного элемента (ЧЭ): а – разбивка на конечные элементы; б – ЧЭ под нагрузкой вдоль оси z

Fig. 5. Model of a sensitive element (SE): а – breakdown into finite elements; б – SE under load along the z axis

тать деформационные характеристики ЧЭ (деформации, внутренние напряжения, относительные удлинения) под воздействием ускорения вдоль оси чувствительности z.

Кольцевой ПАВ-резонатор. Оба рассматриваемых материала ЧЭ – кварц ST-среза и ниобат лития среза YX-128° – являются анизотропными. Фазовые скорости ПАВ в них, коэффициенты электромеханической связи (КЭМС) меняются в зависимости от направления распространения акустической волны в материале.

При расчете и построении топологии КВШП (рис. 6, а) для повышения достоверности результатов важно учитывать изменения фазовой скорости и КЭМС. Для того чтобы рабочая частота акустического устройства оставалась постоянной, необходимо учитывать фазовую скорость в пределах каждого периода топологии кольцевого резонатора отдельно. Тогда анизотропия свойств материала ЧЭ компенсируется неэквидистантностью неаподизированного кольцевого ВШП (рис. 6, б).

Расчет топологии линейного эквидистантного резонатора сводится к определению периода, протяженности преобразователя и апертуры. Период ВШП определяется условием акустического синхронизма: равенством периода топологии длине ПАВ $\lambda = v_{м.с}/f_p$, где

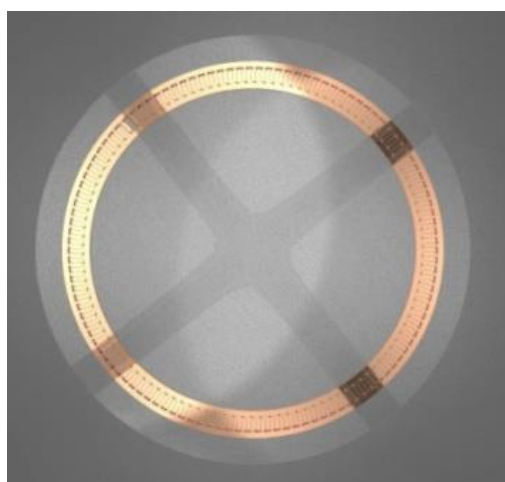
$$v_{м.с} = \frac{1}{d/v_m + (1-d)/v_c}$$

– скорость ПАВ на частично металлизированной подложке, причем v_c , v_m – скорость ПАВ на свободной и металлизированной поверхностях соответственно; $d = 0.5$ – коэффициент металлизации.

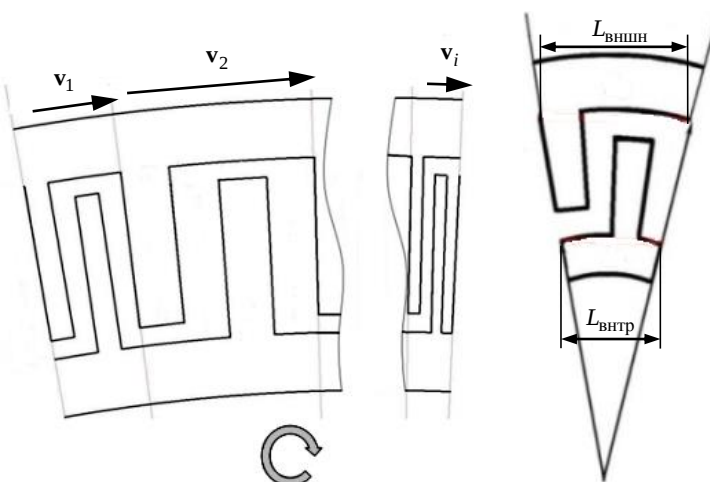
Длина всего преобразователя находится как произведение периода топологии L на их количество N : $L_{ВШП} = LN$.

В неэквидистантном ВШП этот период меняется. Тогда

$$L = \sum_{i=0}^N L_i,$$



а



б

в

Рис. 6. Кольцевой встречно-штыревой преобразователь (КВШП): а – общий вид; б – схема неэквидистантного неаподизированного КВШП; в – определение периодов КВШП

Fig. 6. Ring interdigital transducer (RIT): а – general view; б – scheme of the non-equidistant unapodized RIT; в – determination of the periods of a ring RIT

где i – номер периода топологии, определяемого как

$$L_i = v_i / f_p.$$

Здесь v_i – фазовая скорость ПАВ на i -й паре штырей; f_p – рабочая частота, равная 433 МГц.

Выбирая апертуру преобразователя, необходимо учитывать возможные дифракционные потери, связанные с расходимостью акустического луча ограниченной апертуры. Поэтому апертура электродов ВШП не должна быть меньше значения, определяемого границей зоны Френеля:

$$W = \sqrt{\lambda L_{\text{ВШП}} |1 + \gamma|},$$

где γ – параметр анизотропии.

Длина кольцевого резонатора преобразователя – это длина окружности: $L_{\text{ВШП}} = 2\pi R$, где R – средний радиус кольца.

Апертура будет равна:

$$W = \sqrt{(v/f_p) 2\pi R |1 + \gamma|} = M \sqrt{R},$$

где $M = \sqrt{(v/f_p) 2\pi |1 + \gamma|}$. Максимальная апертура соответствует максимальной скорости ПАВ, поэтому M_{max} достигается при v_{max} . Максимальная фазовая скорость поверхностной волны в кварце ST-среза составляет 3569.53 м/с, $\gamma = +0.378$. В ниобате лития среза YX-128° максимальная фазовая скорость 3739.2 м/с, $\gamma = -0.37$. Отсюда получаем для кварца $W > 0.009\sqrt{R}$, для ниобата лития $W > 0.006\sqrt{R}$. Примем для обоих материалов $M_{\text{max}} = 0.01$, тогда $W > 0.01\sqrt{R}$.

В КВШП апертура $W = (R_2 - R_1)$. Считая, что она существенно меньше среднего радиуса $R = (R_2 + R_1)/2$, получаем требование к апертуре кольцевого резонатора:

$$R \gg W > 0.01\sqrt{R}.$$

Зависимость апертуры КВШП от радиуса кольца представлена на рис. 7. Эта кривая является границей минимального значения апертуры относительно радиуса кольцевого резонатора.

Очевидно, что для лучшего съема информации амплитудно-частотная характеристика преобразователя должна иметь узкий пик. Однако периоды топологии КВШП являются веерными: расстояние между осями симметрии штырей мо-

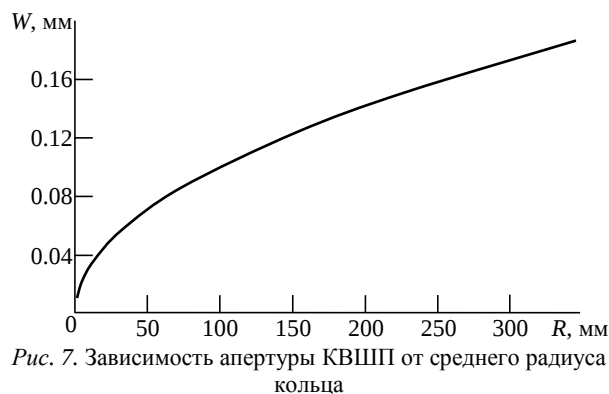


Рис. 7. Зависимость апертуры КВШП от среднего радиуса кольца

Fig. 7. The dependence of the aperture of the RIT on the average radius of the ring

нотонно изменяется по его ширине. Это расширяет АЧХ за счет топологии резонатора.

На анизотропном материале фазовая скорость ПАВ переменная, но, так как резонатор неэквидистантный, примем, что на каждом периоде топологии скорость постоянна и известна. Тогда ширина АЧХ:

$$\Delta\omega = f_{\text{вншн}} - f_{\text{внтр}},$$

где

$$f_{\text{вншн}} = v_{\text{м.с}} / L_{\text{вншн}}, \quad f_{\text{внтр}} = v_{\text{м.с}} / L_{\text{внтр}}$$

– частоты ПАВ около внешнего и внутреннего радиусов соответственно, причем ($L_{\text{вншн}}$, $L_{\text{внтр}}$ – ширина периода топологии около внутреннего и внешнего радиусов соответственно, см. рис. 6, в).

В силу малости ширины периода топологии по сравнению с длиной преобразователя L приравняем ее длине дуги соответствующего радиуса:

$$L_{\text{внтр}} = \theta_{\text{п}} R_1; \quad L_{\text{вншн}} = \theta_{\text{п}} R_2,$$

где $\theta_{\text{п}}$ – угловой период. Тогда

$$\Delta\omega = f_p \frac{R_2 - R_1}{R} = f_p \frac{W}{R}$$

и условие для узкого пика АЧХ: $W/R \rightarrow \min$.

Результаты расчетов. Динамический диапазон. Значения деформаций и внутренних напряжений были пересчитаны в значения выходного сигнала датчика для всех предложенных соотношений размеров и материалов. На рис. 8 показаны выходные характеристики для ЧЭ из двух материалов и четырех вариантов соотношений размеров: квадрат радиуса к толщине ЧЭ.

В табл. 1 представлены результаты расчетов: масштабные коэффициенты в дифференциальном

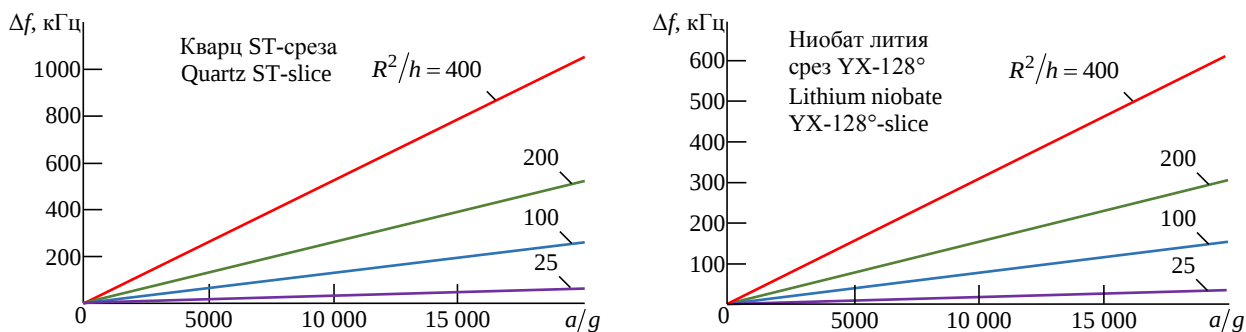


Рис. 8. Выходные характеристики чувствительных элементов

Fig. 8. The output characteristics of the sensing elements

Таблица 1. Характеристики ММА на ПАВ

Table 1. Characteristics of a micromechanical accelerometer using SAW

Параметр	R^2/h , мм			
	25	100	200	400
<i>Кварц ST-среза</i>				
Масштабный коэффициент (дифференциальный режим), кГц/г	0.0063	0.0259	0.0523	0.1053
Диапазон измеряемых ускорений, г	±200 и более	±200 и более	±200 и более	±200 и более
Порог чувствительности, г	68	17	9	4
<i>Ниобат лития среза YX-128°</i>				
Масштабный коэффициент (дифференциальный режим), кГц/г	0.0035	0.0151	0.0304	0.0612
Диапазон измеряемых ускорений, г	±200 и более	±200 и более	±200 и более	±200 и более
Порог чувствительности, г	120	29	14	7

режиме, диапазоны измеряемых ускорений, пороги чувствительности.

Модельный эксперимент показал, что при нагрузке ЧЭ инерционной массой цилиндрической формы, размещенной на ЧЭ соосно по оси z (см. рис. 5, б), повышается чувствительность КВШП. При этом с ростом ИМ увеличивается и приращение частоты. В связи с этим был проведен анализ характеристик ЧЭ в напряженно-деформированном инерционной массой состоянии.

При одинаковых условиях для двух материа-

лов пластины максимальная чувствительность наблюдается при условии $R_{ИМ} < H$ (где $R_{ИМ}$ – радиус ИМ; H – высота ИМ) и отношении $R_{ИМ}/R < 1$, а зона наибольшей чувствительности элемента смещается к месту крепления и достигает своего максимума при $R_{ИМ}/R = 3/5$, после чего происходит спад (рис. 9, а).

Таким образом, радиус ИМ должен составлять 60 % от радиуса ЧЭ. Напротив, зависимость чувствительности от соотношения высот ЧЭ и

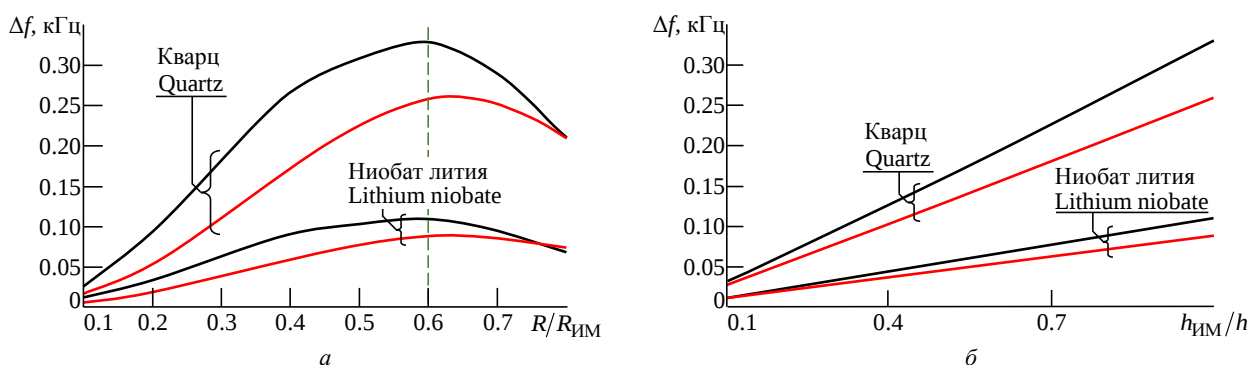


Рис. 9. Зависимости смещения частоты для исследованных ЧЭ от отношения радиуса пластины и радиуса ИМ (а) и от отношения высоты инерционной массы (ИМ) к высоте чувствительного элемента (ЧЭ) (б).

Черные кривые – вблизи крепления ЧЭ; красные кривые – вблизи крепления ИМ

Fig. 9. The dependence of the frequency shift for the investigated sensing elements (SE) on the ratio of the plate radius and the radius of the inertial mass (IM) (a) and on the ratio of IM to the height of the SE (б).

Black curves – nearly SE fixing; red curves – nearly IM fixing

ИМ (рис. 9, б) не имеет экстремума. Поэтому высота ИМ ограничивается только целесообразностью и конструктивными особенностями прибора.

Из описанных результатов можно сделать вывод, что для увеличения порога чувствительности сенсора, построенного как с применением кварца ST-среза, так и ниобата лития YX-128°, при использовании ИМ рекомендуется обеспечивать:

- расположение кольцевого резонатора вблизи места крепления ЧЭ;
- отношение радиуса ИМ к радиусу пластины $R_{\text{ИМ}}/R = 3/5$.

Получив оптимальный размер ИМ (под оптимальностью ИМ понимается размер, при котором достигается максимальная чувствительность ЧЭ) и определив зону чувствительности, можно оценить динамический диапазон.

Таким образом, размещение топологии резонатора на противоположных сторонах ЧЭ, по окружности и вблизи места крепления ЧЭ к корпусу, расположение ИМ цилиндрической формы по центру ЧЭ, обеспечение отношения радиуса ИМ к радиусу пластины равным 3/5 приводит к повышению пороговой чувствительности.

В табл. 2 представлены результаты расчетов, аналогичные табл. 1, для КВШП с ЧЭ в напря-

женно-деформированном инерционной массой состоянии при оптимальных размерах ИМ для каждого материала и расположения резонатора в зоне наибольшей чувствительности.

Результаты пересчета внутренних напряжений в значения выходного сигнала датчика с ЧЭ в напряженно-деформированном состоянии представлены на рис. 10.

По результатам проделанной работы предложена блок-схема методики расчета ММА на ПАВ с кольцевым резонатором на анизотропном материале (рис. 11).

Методика разбивает расчет на 2 последовательных этапа: расчет механической части ЧЭ и расчет топологии КВШП. Для начала необходимо задать требуемые условия: рабочую частоту устройства, динамический диапазон, пороговую чувствительность, габариты и массу. Затем – выбрать материал и размер ЧЭ, рассчитать динамический диапазон. Расширить динамический диапазон можно выбрав другой материал или размер ЧЭ, а сузить – добавив инерционную массу.

Далее необходимо провести анализ порога чувствительности: повысить его можно нагрузив чувствительный элемент ИМ. Переходить к расчету топологии КВШП целесообразно после рас-

Таблица 2. Характеристики ММА на ПАВ с ЧЭ в напряженно-деформированном состоянии

Table 2. Characteristics of a micromechanical accelerometer using SAW with sensing element in the tense deformed state

Параметр	R^2/h , мм			
	25	100	200	400
<i>Кварц ST-среза</i>				
Масштабный коэффициент (дифференциальный режим), кГц/г	1.48	6.69	13.81	27.58
Диапазон измеряемых ускорений, g	±200 и более	±200 и более	±177	±95
Порог чувствительности, g	0.29	0.063	0.031	0.016
<i>Ниобат лития среза YX-128°</i>				
Масштабный коэффициент (дифференциальный режим), кГц/г	0.39	1.73	3.70	7.43
Диапазон измеряемых ускорений, g	±200 и более	±200 и более	±167	±84
Порог чувствительности, g	1.08	0.24	0.11	0.06

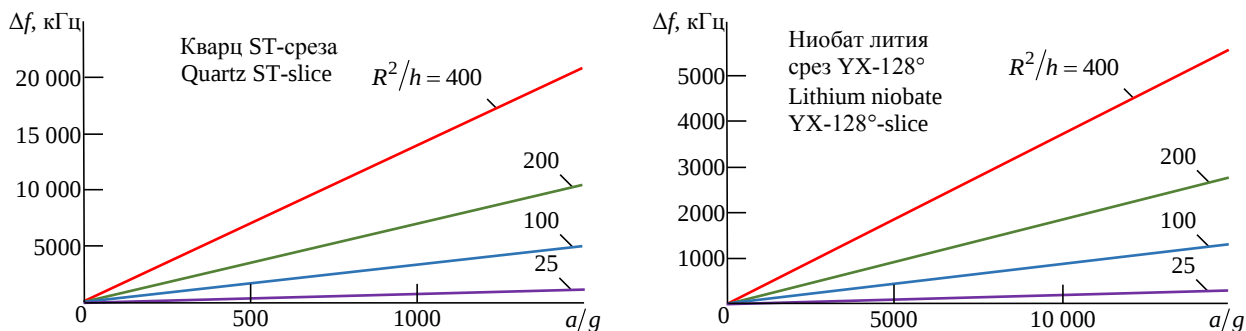


Рис. 10. Выходные характеристики ЧЭ в напряженно-деформированном состоянии

Fig. 10. The output characteristics of the sensing element in the tense deformed state

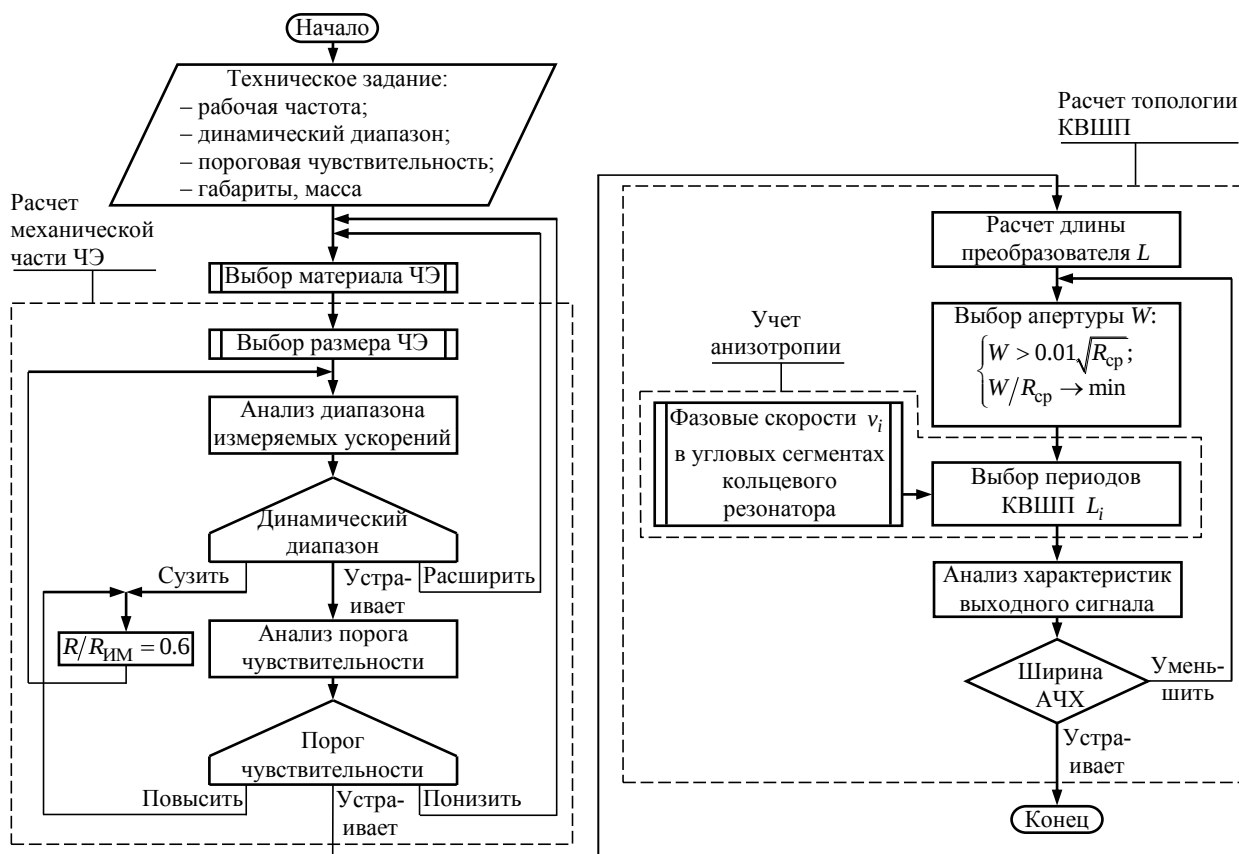


Рис. 11. Блок-схема методики расчета ММА с кольцевым ПАВ-резонатором на анизотропном материале

Fig. 11. Block diagram of the calculation method of the micromechanical accelerometer on SAW with a ring resonator using an anisotropic material

чета механической части ЧЭ, так как от нее зависит длина преобразователя. Расчет аперттуры и выбор периода КВШП являются важнейшими этапами при проектировании, так как от них зависит качество выходного сигнала.

Заключение. В описанной работе исследованы материалы для ЧЭ ММА на ПАВ: кварц ST-среза и ниобат лития среза YX-128°. Анализ материалов подложек для использования их в составе конструкции ММА на ПАВ показал, что ЧЭ из кварца ST-среза имеет более широкий диапазон измеряемых ускорений и более высокий порог чувствительности, чем ЧЭ из ниобата лития среза YX-128° при прочих равных условиях.

Для повышения порога чувствительности необходимо: размещать топологию ВШП-резонатора на противоположных сторонах ЧЭ, по окружности и вблизи места крепления ЧЭ к корпусу, а также нагружать ЧЭ ИМ цилиндрической формы, расположенной соосно ЧЭ по вертикали. Отношение радиуса ИМ к радиусу пластины должно составлять 3/5.

Для получения максимально узкого пика амплитудно-частотной характеристики резонатора ЧЭ акселерометра необходимо учитывать анизотропию материала ЧЭ неэквидистантностью встречно-штыревого преобразователя. При проектировании КВШП следует выполнять условия $R_{cp} \gg W > 0.01\sqrt{R_{cp}}$; $W/R_{cp} \rightarrow \min$.

Авторский вклад

Лукьянов Дмитрий Павлович – обзор использования ММА на ПАВ в составе системы диагностики железной дороги; обоснование принципа построения ММА на ПАВ.

Боронахин Александр Михайлович – обзор использования ММА на ПАВ в составе системы диагностики железной дороги; формулировка технических требований к ММА на ПАВ с учетом условий эксплуатации в составе системы диагностики.

Шевченко Сергей Юрьевич – обзор существующих МЭМС; основы концепции построения ММА на ПАВ.

Хиврич Мария Александровна – концепция построения ММА на ПАВ с кольцевым резонатором на анизотропном материале; расчеты; блок-схема; выходная характеристика.

Амиров Темурмалик Анвар угли– обзор существующих МЭМС.

Authors' contribution

Dmitry P. Lukyanov, a review of the use of MMA on SAW as part of a railway diagnostic system; substantiation of the principle of building MMA on SAW.

Alexander M. Boronakhin, a review of the use of MMA on SAW as part of a railway diagnostic system; formulation of technical requirements for MMA on SAW, taking into account operating conditions as part of the diagnostic system.

Sergey Yu. Shevchenko, review of existing MEMS; fundamentals of the concept of building MMA on SAW.

Mariya A. Khivrich, the concept of building MMA on SAW with a ring resonator on anisotropic material; calculations; block diagram; output characteristic.

Temurmalik A. Amirov, review of existing MEMS.

Список литературы

1. Mounier E., Troadec C., Girardin G. Status of the MEMS industry 2016. Yole Developpement. Market and Technology report. 2016. 5 p.
2. Mounier E. Status of the MEMS industry 2017. Yole Developpement. Market and Technology report. 2017. 4 p.
3. Mounier E. Status of the MEMS industry 2018. Yole Developpement. Market and Technology report. 2018. 4 p.
4. Использование МЭМС-датчиков для решения задач мониторинга состояния рельсового пути / А. М. Боронахин, Д. Ю. Ларионов, Л. Н. Подгорная, А. Н. Ткаченко, Р. В. Шалымов // Изв. Тульского гос. ун-та. Техн. науки. 2017. № 9 (2). С. 111–123.
5. Сунгуров Д. В., Шалымов Р. В. Инерциальный метод диагностики рельсового пути с учетом состояния поверхностей катания колес вагона // Навигация и управление движением: материалы XVI конф. молодых ученых / Концерн "ЦНИИ "Электроприбор". СПб., 2014. С. 49–55.
6. Использование микромеханических чувствительных элементов в задачах диагностики рельсового пути / А. М. Боронахин, Л. Н. Подгорная, Е. Д. Бохман, Н. С. Филипеня, Ю. В. Филатов, Р. В. Шалымов, Д. Ю. Ларионов // Гироскопия и навигация. 2012. № 1 (76). С. 57–66.
7. Абдуллин Ф. А., Пауткин В. Е. Технологические особенности формирования кремниевых пьезорезистивных акселерометров с расширенным температурным диапазоном измерений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 2. С. 118–123.
8. Абдуллин Ф. А., Пауткин В. Е., Печерский А. В. Материалы, применяемые при изготовлении микроэлектромеханических систем (МЭМС) // Материалы и технологии XXI в. 2016. С. 131–136.
9. Багинский И. Л., Косцов Э. Г. Емкостные МЭМС-акселерометры сверхвысоких ускорений // Автометрия. 2017. Т. 53, № 3. С. 107–116.
10. Парфенов Н. М. Аналитические исследования интегральных МЭМС-акселерометров // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 2. С. 96–109.
11. Сысоева С. Автомобильные акселерометры. Ч. 3. Классификация и анализ базовых рабочих принципов // Компоненты и технологии. 2006. № 2. С. 42–49.
12. Петропавловский Ю. Современные МЭМС-продукты компании AnalogDevices. Ч. 2 // Элементы и компоненты. 2015. № 7. С. 24–29.
13. Сысоева С. МЭМС-технологии. Простое и доступное решение сложных систематических задач // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2009. № 7. С. 80–89.
14. Сысоева С. Введение в High-End сегменты применения МЭМС-технологии // Компоненты и технологии. 2010. № 10. С. 15–22.
15. Одинец А. И., Федорова Л. Д. Датчики МЭМС для управления и диагностирования автомобиля // Омский науч. вестн. 2015. № 2. С. 177–179.
16. Design of a Piezoelectric Accelerometer with High Sensitivity and Low Transverse Effect / B. Tian, H. Liu, N. Yang, Yu. Zhao, Zh. Jiang // Sensors. 2016. № 16. 1587. doi: 10.3390/s16101587
17. Design Strategy for a New High-G Accelerometer / R. Kuells, S. Nau, Ch. Bohland, M. Salk, K. Thoma // Proc. Sensor. 2013. P. 105–110. doi: 10.5162/sensor2013/A5.1
18. Разработка и оптимизация схемы построения микроакселерометра на поверхностных акустических волнах. Ч. 2 / Д. П. Лукьянов, А. А. Тихонов, Ю. В. Филатов, М. М. Шевелько, А. Г. Поваляев, С. Ю. Шевченко, А. А. Стуров, И. В. Попова, А. М. Лестев, М. А. Лестев, В. В. Новиков, М. С. Вершинин // Гироскопия и навигация. 2007. № 3 (58). С. 62–76.
19. Biryukov S. V., Martin G., Weihnacht M. Ring waveguide resonator on surface acoustic waves // Appl. phys. lett. 2007. Vol. 90, iss. 13. doi: 10.1063/1.2731683

20. Ring waveguide resonator on surface acoustic waves: First experiments / S. V. Biryukov, H. Schmidt, A. V. Sotnikov, M. Weihnacht, T. Yu. Chemekova, Yu. N. Markarov // J. of applied physics. 2009. Vol. 106, iss. 12. doi: 10.1063/1.3272027.

21. Biryukov S. V., Schmidt H., Weihnacht M. Performance of SAW Ring Waveguide Resonator: 3D FEM and Experiments // 2009 IEEE Int. Ultrasonics Symp. Rome, Italy, 20–23 Sept. 2009. doi: 10.1109/ULTSYM.2009.5441445

22. Хиврич М. А., Шевченко С. Ю. Моделирование чувствительного элемента микромеханического акселерометра для высокочастотных объектов методом конечных элементов // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. 2018. Т. 1. С. 615–617.

23. Хиврич М. А., Кудряшова М. С., Шевченко С. Ю. Анализ чувствительного элемента микромеханического акселерометра на поверхностных акустических волнах // Навигация и управление движением: конф. молодых ученых / Концерн "ЦНИИ "Электроприбор". СПб., 2018. С. 108–112.

24. Surface-acoustic-wave sensor design for acceleration measurement / S. Shevchenko, A. Kukaev, M. Khivrich, D. Lukyanov // Sensors. 2018. Vol. 18, № 7. art. no. 2301. doi: 10.3390/s18072301

25. Shevchenko S. Yu., Khivrich M. A., Markelov O. A. Ring-shaped sensitive element design for acceleration measurements: overcoming the limitations of angular-shaped sensors // Electronics. 2019. Vol. 8, № 2. art. no. 141. doi: 10.3390/electronics8020141

Информация об авторах

Лукьянов Дмитрий Павлович – доктор технических наук (1974), профессор (1979) кафедры лазерных измерительных и навигационных систем (ЛИНС) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Заслуженный деятель науки РФ (1996). Автор более 200 научных публикаций. Сфера научных интересов – лазерная гироскопия.

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

E-mail: dplukyanov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8171-4475>

Александр Михайлович Боронахин – доктор технических наук (2013), доцент (2005), профессор кафедры ЛИНС, декан факультета информационно-измерительных и биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 120 научных публикаций. Сфера научных интересов – разработка интегрированных инерциальных технологий динамического мониторинга рельсового пути для обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта.

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

E-mail: AMBoronahin@etu.ru

Scopus Author ID: 36453475400

Researcher ID: P-5768-2017

Шевченко Сергей Юрьевич – кандидат технических наук (2007), доцент (2013) кафедры ЛИНС Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 80 научных публикаций. Сфера научных интересов – микросенсоры навигационных систем.

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

E-mail: syshevchenko@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4047-7757>

Хиврич Мария Александровна – магистр по направлению "Приборостроение" (2014). В 2018 г. окончила аспирантуру по направлению "Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии" (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)). Разработчик технической документации АО "Авро-МКС". Автор 10 научных публикаций. Сфера научных интересов – навигация, микромеханические системы.

Адрес: АО "Авро-МКС", ул. Обручевых, д. 9, Санкт-Петербург, 194064, Россия.

E-mail: Mariya-khivrich@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5152-3480>

Амиров Темурмалик Анвар угли – бакалавр по направлению "Электроэнергетика и электротехника" (2018, Ташкентский Государственный Технический Университет им. Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан). Сфера научных интересов – МЭМС; акселерометры и гироскопы; акселерометры и гироскопы на поверхностных акустических волнах.

Адрес: ул. Университетская, д. 2, Ташкент, 100095, Узбекистан.

E-mail: a.temurmali95@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1070-5453>

References

1. Mounier E., Troadec C., Girardin G. Status of the MEMS industry 2016. Yole Developpement. Market and Technology report. 2016, 5 p.
2. Mounier E. Status of the MEMS industry 2017. Yole Developpement. Market and Technology report. 2017, 4 p.
3. Mounier E. Status of the MEMS industry 2018. Yole Developpement. Market and Technology report. 2018, 4 p.
4. Boronakhin A. M., Larionov D. Yu., Podgornaya L. N., Tkachenko A. N., Shalymov R. V. Using MEMS-Sensors for Solving the Railway State Monitoring Problems. *Izvestiya Tula State University* [Proc. of the TSU]. Technical sciences. 2017, no. 9 (2), pp. 111–123. (In Russ.)
5. Sungurov D. V., Shalymov R. V. Inertial Method for Diagnosing a Rail Track, Taking into Account the Condition of the Rolling Surfaces of the Car Wheels. Proc. of the XVI Conf. Young Scientists Navigation and Traffic Control. Concern CRI Elektropribor. SPb., 2014, pp. 49–55. (In Russ.)
6. Boronakhin A. M., Podgornaya L. N., Bokhman E. D., Filipenya N. S., Filatov Yu. V., Shalymov R. V., Larionov D. Yu. MEMS-Based Inertial System for Railway Track Diagnostics. Gyroscopy and Navigation. 2012, no. 1 (76), pp. 57–66. (In Russ.)
7. Abdullin F. A., Pautkin V. E. Technological Features of the Formation of Silicon Piezoresistive Accelerometers with Extended Temperature Range of Measures. Measuring. Monitoring. Management. Control 2016, no. 2, pp. 118–123. (In Russ.)
8. Abdullin F. A., Pautkin V. E., Pecherskii A. V. Materials Used in the Manufacture of Micro-Electromechanical Systems (MEMS). Proc. of the 21st Century Materials and Technologies. 2016, pp. 131–136. (In Russ.)
9. Balaginsky I. L., Kostsov E. G. Capacitive MEMS Accelerometers for Measuring High-G Accelerations. *Avtometriya*. 2017, vol. 53, no. 3, pp. 107–116. (In Russ.) doi: 10.15372/AUT20170314
10. Parfyonov N. M. Analytical Research of the Integral MEMS Accelerometers. Nano- and Microsystems Technology. 2016, vol. 18, no. 2, pp. 96–109. (In Russ.)
11. Sysoeva S. Car accelerometers. P. 3. Classification and Analysis of Basic Operating Principles. Components & Technologies. 2006, no. 2, pp. 42–49. (In Russ.)
12. Petropavlovsky Yu. Modern MEMS Products from AnalogDevices. P. 2. Elements and Components. 2015, no. 7, pp. 24–29. (In Russ.)
13. Sysoeva S. MEMS Technology. A Simple and Available Solution for Complex System Tasks. Electronics: STB. 2009, no. 7, pp. 80–89. (In Russ.)
14. Sysoeva S. Introduction to High-End MEMS Technology Segments. Components & Technologies. 2010, no. 10, pp. 15–22. (In Russ.)
15. Odinet A. I., Fedorova L. D. MEMS Sensors for Vehicle Control and Diagnostics. Omsk Scientific Bulletin. 2015, no. 2, pp. 177–179. (In Russ.)
16. Tian B., Liu H., Yang N., Zhao Yu., Jiang Zh. Design of a Piezoelectric Accelerometer with High Sensitivity and Low Transverse Effect. Sensors. 2016, no. 16, 1587. doi: 10.3390/s16101587
17. Kuells R., Nau S., Bohland Ch., Salk M., Thoma K. Design Strategy for a New High-G Accelerometer. Proc. Sensor 2013, pp. 105–110. doi: 10.5162/sensor2013/A5.1
18. Lukianov D. P., Tikhonov A. A., Filatov Yu. V., Shevelko M. M., Povalyayev A. G., Shevchenko S. Yu., Sturov A. A., Popova I. V., Lestev A. M., Lestev M. A., Novikov V. V., Vershinin M. S. Development and Optimization of the Surface Acoustic-Waves Microaccelerometer Construction Scheme. Part 2. Gyroscopy and Navigation. 2007, no. 3 (58), pp. 62–76. (In Russ.)
19. Biryukov S. V., Martin G., Weihnacht M. Ring Waveguide Resonator on Surface Acoustic Waves. Applied Physics Letters. 2007, vol. 90, iss. 13. doi: 10.1063/1.2731683
20. Biryukov S. V., Schmidt H., Sotnikov A. V., Weihnacht M., Chemekova T. Yu., Makarov Yu. N. Ring Waveguide Resonator on Surface Acoustic Waves: First Experiments. J. of applied physics. 2009, vol. 106, iss. 12. doi: 10.1063/1.3272027
21. Biryukov S. V., Schmidt H., Weihnacht M. Performance of SAW Ring Waveguide Resonator: 3D FEM and Experiments. 2009 IEEE Int. Ultrasonics Symp. Rome, Italy, 20–23 Sept. 2009. doi: 10.1109/ULTSYM.2009.5441445
22. Khivrich M. A., Shevchenko S. Yu. Modeling a Sensitive Element of a Micro-Mechanical Accelerometer for Highly Dynamic Objects Using the Finite Element Method. Proc. of the Intern. Conf. on Soft Calculations and Measurements. 2018, vol. 1, pp. 615–617. (In Russ.)
23. Khivrich M. A., Kudryashova M. S., Shevchenko S. Yu. Analysis of a Sensitive Element of a Micromechanical Accelerometer on Surface Acoustic Waves. Conf. of Young Scientists Navigation and Motion Control. SPb., 2018, pp. 108–112. (In Russ.)
24. Shevchenko S., Kukaev A., Khivrich M., Lukyanov D. Surface-Acoustic-Wave Sensor Design for Acceleration Measurement. Sensors. 2018, vol. 18, no. 7, art. no. 2301. doi: 10.3390/s18072301
25. Shevchenko S. Yu., Khivrich M. A., Markelov O. A. Ring-Shaped Sensitive Element Design for Acceleration Measurements: Overcoming the Limitations of Angular-Shaped Sensors. Electronics, 2019, vol. 8, no. 2, art. no. 141. doi: 10.3390/electronics8020141

Information about the authors

Dmitry P. Lukyanov, Dr. Sci. (Eng.) (1974), Professor (1979) of the Department of Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. Honored Scientist of the Russian Federation (1996). The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: laser gyroscopy.

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

E-mail: dplukyanov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8171-4475>

Alexander M. Boronakhin, Dr. Sci. (Eng.) (2013), Associate Professor (2005), of the Department of Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 120 scientific publications. Area of expertise: development of integrated inertial technologies for dynamic monitoring of the rail track to ensure the safety of rail traffic.

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

E-mail: AMBoronahin@etu.ru

Scopus Author ID: 36453475400

Researcher ID: P-5768-2017

Sergey Yu. Shevchenko, Cand. Sci. (2007), Associate Professor (2013) of the Department of Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 80 scientific publications. Area of expertise: microsensors of navigation systems.

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

E-mail: syshevchenko@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4047-7757>

Mariya A. Khivrich, Master on Instrument Engineering (2014). In 2018, she completed postgraduate studies in the field of "Photonics, Instrument Engineering, Optical and Biotechnological Systems and Technologies" (Saint Petersburg Electrotechnical University). Technical documentation developer in JSC Avro-MKS. The author of 10 scientific publications. Area of expertise: navigation, micromechanical systems.

Address: JSC "Avro-MKS", 9 Obruchevykh Str., St Petersburg 194064, Russia

E-mail: Mariya-khivrich@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5152-3480>

Temurmalik A. Amirov, Bachelor in Electrical Engineering and Electrical Engineering (2018, Tashkent state technical University Named after Islam Karimov). Area of expertise: MEMS; accelerometers and gyroscopes; accelerometers and gyroscopes on surface acoustic waves.

Address: Tashkent state technical University Named after Islam Karimov, 2 Universitetskaya Str., Tashkent 100095, Uzbekistan

E-mail: a.temurmalik95@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1070-5453>

Правила для авторов статей

В редакцию журнала "Известия вузов России. Радиоэлектроника" необходимо представить:

- распечатку рукописи (1 экз.) – твердую копию файла статьи, подписанную всеми авторами (объем оригинальной статьи не менее 8 страниц, обзорной статьи не более 20 страниц);
- электронную копию статьи;
- отдельный файл для каждого рисунка и каждой таблицы в формате тех редакторов, в которых они были подготовлены. Размещение рисунка в электронной копии статьи не освобождает от его представления отдельным файлом;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (1 экз.);
- сведения об авторах и их электронную копию (на русском и английском языках) (1 экз.);
- рекомендацию кафедры (подразделения) к опубликованию (следует указать предполагаемую рубрику) (1 экз.);
- сопроводительное письмо (1 экз.).

Принимаются к публикации статьи на русском и английском языках.

Рукопись не может быть опубликована, если она не соответствует предъявляемым требованиям и материалам, представляемым с ней.

Структура научной статьи

Авторам рекомендуется придерживаться следующей структуры статьи:

- Заголовочная часть:
 - УДК (выравнивание по левому краю);
 - название статьи;
 - авторы (перечень авторов – Ф. И. О. автора (-ов) полностью. Инициалы ставятся перед фамилиями, после каждого инициала точка и пробел; инициалы не отрываются от фамилии. Если авторов несколько – Ф. И. О. разделяются запятыми), если авторов больше 3, необходимо в конце статьи указать вклад каждого в написание статьи;
 - место работы каждого автора и почтовый адрес организации. Если авторы относятся к разным организациям, то после указания всех авторов, относящихся к одной организации, дается ее наименование, а затем список авторов, относящихся ко второй организации, наименование второй организации, и т. д.;
 - аннотация – 200–250 слов, характеризующих содержание статьи;
 - ключевые слова – 5–7 слов и/или словосочетаний, отражающих содержание статьи, разделенных запятыми; в конце списка точка не ставится;
 - источник финансирования – указываются источники финансирования (гранты, совместные проекты и т. п.). Не следует использовать сокращенные названия институтов и спонсирующих организаций;
 - благодарности. В данном разделе выражается признательность коллегам, которые оказывали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес статьи. Прежде чем выразить благодарность, необходимо заручиться согласием тех, кого планируете поблагодарить;
 - конфликт интересов – авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи. Например, «Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов». Если конфликт интересов возможен, то необходимо пояснение (см. <https://publicationethics.org>).
- Заголовочная часть на английском языке:
 - название (Title);
 - авторы (Authors);

- место работы каждого автора (Affiliation). Необходимо убедиться в корректном (согласно уставу организации) написании ее названия на английском языке. Перевод названия возможен лишь при отсутствии англоязычного названия в уставе. Если авторы относятся к разным организациям, то после указания всех авторов, относящихся к одной организации, дается ее наименование, затем приводится список авторов, относящихся ко второй организации, наименование второй организации, и т. д.;
 - аннотация (Abstract);
 - ключевые слова (Keywords);
 - источник финансирования (Acknowledgements);
 - конфликт интересов (Conflict of interest).
- Текст статьи.
 - Приложения (при наличии).
 - Авторский вклад. Если авторов больше 3, необходимо указать вклад каждого в написание статьи.
 - Список литературы (библиографический список);
 - Информация об авторах.

Название статьи должно быть информативным, с использованием основных терминов, характеризующих тему статьи, и четко отражать ее содержание в нескольких словах. Хорошо сформулированное название – гарантия того, что работа привлечет читательский интерес. Следует помнить, что название работы прочтут гораздо больше людей, чем ее основную часть.

Авторство и место в перечне авторов определяется договоренностью последних. При примерно равном авторском вкладе рекомендуется алфавитный порядок.

Аннотация представляет собой краткое описание содержания изложенного текста. Она должна отражать актуальность, постановку задачи, пути ее решения, фактически полученные результаты и выводы. Содержание аннотации рекомендуется представить в структурированной форме:

Введение. Приводится общее описание исследуемой области, явления. Аннотацию не следует начинать словами «Статья посвящена...», «Цель настоящей статьи...», так как вначале надо показать необходимость данного исследования в силу пробела в научном знании, почему и зачем проведено исследование (описать кратко).

Цель работы. Постановка цели исследования (цель может быть заменена гипотезой или исследовательскими вопросами).

Материалы и методы. Обозначение используемой методологии, методов, процедуры, где, как, когда проведено исследование и пр.

Результаты. Основные результаты (приводятся кратко с упором на самые значимые и привлекательные для читателя/научного сообщества).

Обсуждение (Заключение). Сопоставление с другими исследованиями, описание вклада исследования в науку.

В аннотации не следует упоминать источники, использованные в работе, пересказывать содержание отдельных разделов.

При написании аннотации необходимо соблюдать особый стиль изложения: избегать длинных и сложных предложений, выражать мысли максимально кратко и четко. Составлять предложения только в настоящем времени и только от третьего лица.

Рекомендуемый объем аннотации – 200–250 слов.

Ключевые слова – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования. Рекомендуемое количество ключевых слов/фраз – 5–7, количество слов внутри ключевой фразы – не более 3.

Текст статьи излагается в определенной последовательности. Рекомендуется придерживаться формата IMRAD (Introduction, Methods, Results, Discussion; Введение, Методы, Результаты, Обсуждение):

Введение. Во введении автор знакомит с предметом, задачами и состоянием исследований по теме публикации; при этом необходимо обязательно ссылаться на источники, из которых берется информация. Автор приводит описание "белых пятен" в проблеме или того, что еще не сделано, и формулирует цели и задачи исследования.

В тексте могут быть применены сноски, которые нумеруются арабскими цифрами. В сносках могут быть размещены: ссылки на анонимные источники из Интернета, ссылки на учебники, учебные пособия, ГОСТы, авторефераты, диссертации (если нет возможности процитировать статьи, опубликованные по результатам диссертационного исследования).

Методы. Необходимо описать теоретические или экспериментальные методы исследования, используемое оборудование и т. д., чтобы можно было оценить и/или воспроизвести исследование. Метод или методологию проведения исследования целесообразно описывать в том случае, если они отличаются новизной.

Научная статья должна отображать не только выбранный инструментарий и полученные результаты, но и логику самого исследования или последовательность рассуждений, в результате которых получены теоретические выводы. По результатам экспериментальных исследований целесообразно описать стадии и этапы экспериментов.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. В описании полученных результатов не должно быть никаких пояснений – они даются в разделе «Обсуждение».

Обсуждение (Заключение и Выводы). В этой части статьи авторы интерпретируют полученные результаты в соответствии с поставленными задачами исследования, приводят сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Необходимо показать, что статья решает научную проблему или служит приращению нового знания. Можно объяснять полученные результаты на основе своего опыта и базовых знаний, приводя несколько возможных объяснений. Здесь излагаются предложения по направлению будущих исследований.

Список литературы (библиографический список) содержит сведения о цитируемом, рассматриваемом или упоминаемом в тексте статьи литературном источнике. В список литературы включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов и монографии).

Список литературы должен иметь не менее 15 источников (из них, при наличии, не более 20 % – на собственные работы), имеющих статус научных публикаций.

Приветствуются ссылки на современные англоязычные издания (требования МНБД Scopus – 80 % цитируемых англоязычных источников).

Ссылки на неопубликованные и нетиражированные работы не допускаются. Не допускаются ссылки на учебники, учебные пособия, справочники, словари, диссертации и другие малотиражные издания.

Если описываемая публикация имеет цифровой идентификатор Digital Object Identifier (DOI), его необходимо указывать в самом конце библиографической ссылки в формате "doi: ...". Проверять наличие DOI статьи следует на сайте: <http://search.crossref.org> или <https://www.citethisforme.com>.

Нежелательны ссылки на источники более 10–15-летней давности, приветствуются ссылки на современные источники, имеющие идентификатор doi.

За достоверность и правильность оформления представляемых библиографических данных авторы несут ответственность вплоть до отказа в праве на публикацию.

Аннотация на английском языке (Abstract) в русскоязычном издании и международных базах данных является для иностранных читателей основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и изложенных в ней результатах исследований. Зарубежные специалисты по аннотации оценивают публикацию, определяют свой интерес к работе российского ученого, могут использовать ее в своей публикации и сделать на нее ссылку, открыть дискуссию с автором.

Текст аннотации должен быть связным и информативным. При написании аннотации рекомендуется использовать Present Simple Tense. Present Perfect Tense является допустимым. Рекомендуемый объем – 200–250 слов.

Список литературы (References) для зарубежных баз данных приводится полностью отдельным блоком, повторяя список литературы к русскоязычной части. Если в списке литературы есть ссылки на иностранные публикации, то они полностью повторяются в списке, готовящемся в романском алфавите. В References совершенно недопустимо использовать российский ГОСТ 7.0.5–2008. Библиографический список представляется с переводом русскоязычных источников на латиницу. При этом применяется транслитерация по системе BSI (см. <http://ru.translit.net/?account=bsi>).

Типовые примеры описания в References приведены на сайте журнала <https://re.eltech.ru>.

Сведения об авторах

Включают для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание (с датами присвоения и присуждения), почетные звания (с датами присвоения и присуждения), краткую научную биографию, количество печатных работ и сферу научных интересов (не более 5–6 строк), название организации, должность, служебный и домашний адреса, служебный и домашний телефоны, адрес электронной почты. Если ученых и/или академических степеней и званий нет, то следует указать место получения высшего образования, год окончания вуза и специальность. Также требуется включать идентификационный номер исследователя ORCID (Open Researcher and Contributor ID), который отображается как адрес вида <http://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>. При этом важно, чтобы кабинет автора в ORCID был заполнен информацией об авторе, имел необходимые сведения о его образовании, карьере, другие статьи. Вариант «нет общедоступной информации» при обращении к ORCID не допускается. В сведениях следует указать автора, ответственного за прохождение статьи в редакции.

Правила оформления текста

Текст статьи подготавливается в текстовом редакторе Microsoft Word. Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля – верхнее, левое и нижнее 2.5 см, правое 2 см; колонтитулы – верхний 2 см, нижний 2 см. Применение полужирного и курсивного шрифтов допустимо при крайней необходимости.

Дополнительный, поясняющий текст следует выносить в подстрочные ссылки при помощи знака сноски, а при большом объеме – оформлять в виде приложения к статье. Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) – в квадратных прямых.

Все сведения и текст статьи набираются гарнитурой "Times New Roman"; размер шрифта 10.5 pt; выравнивание по ширине; абзацный отступ 0.6 см; межстрочный интервал "Множитель 1.1"; автоматическая расстановка переносов.

Правила верстки списка литературы, формул, рисунков и таблиц подробно описаны на сайте <https://re.eltech.ru>.

Перечень основных тематических направлений журнала

Тематика журнала соответствует группам специальностей научных работников:

- 05.12.00 – "Радиотехника и связь" (05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения, 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии, 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций, 05.12.14 Радиолокация и радионавигация);
- 05.27.00 – "Электроника" (05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника на квантовых эффектах, 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника, 05.27.03 – Квантовая электроника, 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники);
- 05.11.00 – "Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы" в редакции приказа ВАК от 10.01.2012 № 5 (05.11.01 – Приборы и методы измерения по видам измерений, 05.11.03 – Приборы навигации, 05.11.06 – Акустические приборы и системы, 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы, 05.11.08 – Радиоизмерительные приборы, 05.11.10 – Приборы и методы для измерения ионизирующих излучений и рентгеновские приборы, 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, 05.11.14 – Технология приборостроения, 05.11.15 – Метрология и метрологическое обеспечение, 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям), 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения, 05.11.18 – Приборы и методы преобразования изображений и звука).

Указанные специальности представляются в журнале следующими основными рубриками:

"Радиотехника и связь":

- Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов.
- Проектирование и технология радиоэлектронных средств.
- Телевидение и обработка изображений.
- Электродинамика, микроволновая техника, антенны.
- Системы, сети и устройства телекоммуникаций.
- Радиолокация и радионавигация.

"Электроника":

- Микро- и наноэлектроника.
- Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника.
- Радиофотоника.
- Электроника СВЧ.

"Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы":

- Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн.
- Метрология и информационно-измерительные приборы и системы.
- Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий.

Адрес редакционной коллегии: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", редакция журнала "Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника"

Технические вопросы можно выяснить по адресу radioelectronic@yandex.ru

Известия высших учебных заведений России. **РАДИОЭЛЕКТРОНИКА**
Journal of the Russian Universities. **RADIOELECTRONICS**

Том 22 № 5 2019

Vol. 22 No. 5 2019

Научный редактор А. М. Мончак
Редакторы: Э. К. Долгатов, И. Г. Скачек
Выпускающий редактор И. Г. Скачек
Компьютерная верстка Е. И. Третьяковой

Science Editor A. M. Monchak
Editors: E. K. Dolgатов, I. G. Skachek
Publishing Editor I. G. Skachek
DTP Professional E. I. Tretyakova

Подписано в печать 29.11.19. Формат 60×84 1/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Гарнитура «Times New Roman».
Уч.-изд. л. 17,55. Усл.-печ. л. 16,75. Тираж 300 экз. (1-й завод 1–150 экз.) Заказ 153.

Signed to print 29.11.19. Sheet size 60×84 1/8.
Educational-ed. liter. 17,55. Conventional printed sheets 16,75. Number of copies 300.
Printing plant 1–150 copies. Order no. 153.

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

ETU Publishing house
5 Prof. Popov Str., St Petersburg 197376, Russia