

DOI: 10.32603/1993-8985

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

Известия высших учебных заведений России

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Том 25 № 3 2022

Journal of the Russian Universities **RADIOELECTRONICS**

Vol. 25 No. 3 2022

Санкт-Петербург Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

2022

Saint Petersburg ETU Publishing house

—Л/—Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (ПИ № ФС77-74297 от 09.11.2018 г.). Индекс по каталогу АО «Почта России» П4296 Учредитель и издатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») Журнал основан в 1998 г. Издается 6 раз в год. Включен в RSCI на платформе Web of Science, Ulrichsweb Global Serials Director, Bielefild Academic Search Engine,

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

А. В. СОЛОМОНОВ, д.ф.-м.н., проф., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ В. М. КУТУЗОВ, д.т.н., президент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

Matthias A. HEIN, PhD, Dr Rer. Nat. Habil., Prof., Технический университет, Ильменау, Германия Jochen HORSTMANN, PhD, Dr Rer. Nat., директор департамента, Гельмгольц-центр, Гестахт, Германия Alexei KANAREYKIN, Dr Sci., гл. исполн. директор, Euclid TechLabs LLC, Солон, США Erkki LAHDERANTA, PhD, Prof., Технический университет, Лаппеенранта, Финляндия Ferran MARTIN, PhD (Phys.), Prof., Автономный университет, Барселона, Испания Piotr SAMCZYNSKI, PhD, Dr Sci., Associate Prof., Варшавский технологический университет, Институт электронных систем, Варшава, Польша Thomas SEEGER, Dr Sci. (Eng.), Prof., Университет Зигена, Зиген, Германия

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

С. Т. КНЯЗЕВ, д.т.н., доц., Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия А. Н. ЛЕУХИН, д.ф-м.н., проф., Марийский государственный технический университет, Йошкар-Ола, Россия

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

Google Scolar, Library of Congress, Recearch4life, ResearchBib, WorldCat, The Lens, OpenAIRE. Индексируется и архивируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ); соответствует декларации Budapest Open Access Initiative, является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ), Crossref. **Редакция журнала:** 197022, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Тел.: 8 (812) 234-10-13, e-mail: radioelectronic@yandex.ru **RE.ELTECH.RU** © СПбГЭТУ «ЛЭТИ», оформление, 2020

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

н. м. Рыскин, д.ф.-м.н., гл.н.с., Саратовский филиал иез 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

Н. К. ЮРКОВ, д.т.н., проф., Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

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

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

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

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

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

Subscription index in JSC "Post of Russia" catalogue is Π4296 Founder and publisher: Saint Petersburg Electrotechnical University (ETU)

Founded in 1998. Issued 6 times a year.

The journal is included in RSCI (Web of Science platform), Ulrichsweb Global Serials Director, Bielefi ld Academic Search Engine, Google Scholar, Library of Congress, Research4life, ResearchBib, WorldCat, The Lens, OpenAIRE. The journal is indexed and archived in the Russian science citation index (RSCI).

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

Editorial adress

ETU, 5F Prof. Popov St., St Petersburg 197022, Russia Tel.: +7 (812) 234-10-13 E-mail: radioelectronic@yandex.ru **RE.ELTECH.RU** © ETU, design, 2020

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF

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

St Petersburg, Russia

CHAIRMAN OF THE EDITORIAL BOARD Vladimir M. KUTUZOV, Dr Sci. (Eng.), President, Saint Petersburg Electrotechnical University,

Saint 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

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

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

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

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

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

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

Sergey B. MAKAROV, Dr Sci. (Eng.), Professor, Institute of Physics, Nanotechnology and Telecommunication St Petersburg Polytechnic University, St Petersburg, Russia Ferran MARTIN, PhD (Phys.), Professor, Autonomous University, Barcelona, Spain

Leonid A. MELNIKOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia **Andrei A. MONAKOV,** Dr Sci. (Eng.), Professor, State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia

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

Key Objectives:

-provide researchers in the fi eld of radioelectronics with the opportunity to promote their research results;

- expand the scope of professional dialogue between Russian and foreign researchers;

-promote the theoretical and practical achievements of Russian scientists in the fi eld of radioelectronics at the international level; Alexander A. POTAPOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of RAS, Moscow, Russia Nikita M. RYSKIN, Dr Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Saratov Branch, Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Saratov, Russia

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

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

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

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

Vladislav A. TSAREV, Dr Sci. (Eng.), Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, Russia Aleksey B. USTINOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University,

St Petersburg, Russia

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

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

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

Nikolay K. YURKOV, Dr Sci. (Eng.), Professor, Penza State University, Penza, Russia

EXECUTIVE SECRETARY

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

- acquaint readers with international best practices in the implementation of scientifi c results;

 attract promising young specialists to scientifi c work in the fi eld of radioelectronics;

- inform readers about symposia, conferences and seminars in the fi eld of Radioelectronics



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

СОДЕРЖАНИЕ

Обзорные статьи

Электродинамика, микроволновая техника, антенны	
Лойко В. А., Добровольский А. А., Кочемасов В. Н., Сафин А. Р. Автогенераторы на поверхностных акустических волнах (обзор)	6
Оригинальные статьи	
Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов	
Монаков А. А. Новый алгоритм оценки вектора скорости цели в РСА на основе согласованного фильтра Меллина	.22
Радиолокация и радионавигация	
Дао Ван Лук, Коновалов А. А., Ле Минь Хоанг. Экспериментальное исследование траекторных признаков для распознавания низколетящих малоскоростных радиолокационных целей в полуактивной РЛС	39
Рубцов Е. А., Федоров А. В., Поваренкин Н. В., Аль-Рубой Мудар. Особенности обнаружения беспилотных воздушных судов с применением посадочного радиолокатора	.51
Фотоника	
Губина А. А., Левин Е. В., Романович М. М., Дегтерев А. Э., Патоков Н. О., Ламкин И. А., Тарасов С. А. Определение оптимального спектрального состава излучения светодиодной фитолампы для стимуляции развития семян моркови и томата	.62
Ламкин И. А., Дегтерев А. Э., Михайлов И. И., Романович М. М., Патоков Н. О., Тарасов С. А. Использование фотовольтаических элементов для автономного энергообеспечения приборов радиоэлектроники на примере Wi-Fi-роутера	.73
Электроника СВЧ	
Тумаркин А. В., Сапего Е. Н., Гагарин А. Г., Тюрнина Н. Г., Тюрнина З. Г., Синельщикова О. Ю., Свиридов С. И. Структурные и электрические свойства стеклокерамических сегнетоэлектрических композитных материалов	.86
Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий	
Фаридоддин Шариати, Павлов В. А., Завьялов С. В., Махди Оруджи, Первунина Т. М. Применение модели внешнего вида текстуры для сегментации легочных узлов при компьютерной томографии грудной клетки	.96
От редакции	
Правила для авторов статей1	18
Объявление1	23
4	

CONTENTS

Review articles

Electrodynamics, Microwave Engineering, Antennas

Loiko V. A., Dobrovolsky A. A., Kochemasov V. N., Safin A. R. Self-Oscillators Based on Surface Acoustic Waves (A Review)
Original articles
Radio Electronic Facilities for Signal Transmission, Reception and Processing
Monakov A. A. An Algorithm for Estimating the Velocity of a Moving Target Based on Mellin Matched Filter
Radar and Navigation
Dao Van Luc, Konovalov A. A., Le Minh Hoang. Experimental Study of Trajectory Features for the Recognition of Low-Flying Low-Speed Radar Targets Using Passive Coherent Radar Systems39
Rubtsov E. A., Fedorov A. V., Povarenkin N. V., Al-Rubaye Mudher. Features of Unmanned Aircraft Detection Using Precision Approach Radar
Photonics
Gubina A. A., Levin E. V., Romanovich M. M., Degterev A. E., Patokov N. O., Lamkin I. A., Tarasov S. A. Optimal Spectral Radiation Composition of a LED Phytolapm for Stimulating Carrot and Tomato Seed Development
Lamkin I. A., Degterev A. E., Mikhailov I. I., Romanovich M. M., Patokov N. O., Tarasov S. A. The Use of Photovoltaic Cells for Autonomous Power Supply of Radio Electronic Devices on the Example of a Wi-Fi Router
SHF Electronics
Tumarkin A. V., Sapego E. N., Gagarin A. G., Tyurnina N. G., Tyurnina Z. G., Sinelshchikova O. Yu., Sviridov S. I. Structural and Electrical Properties of Glass-Ceramic Ferroelectric Composite Materials
Medical Devices, Environment, Substances, Material and Product
Faridoddin Shariaty, Pavlov V. A., Zavjalov S. V., Mahdi Orooji, Pervunina T. M. Application of a Texture Appearance Model for Segmentation of Lung Nodules on Computed Tomography of the Chest
From the Editor

Author's Guide	118
Announcement	

Электродинамика, микроволновая техника, антенны

УДК 537.862

https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-3-6-21

Обзорная статья

Автогенераторы на поверхностных акустических волнах (обзор)

В. А. Лойко^{1, 2}, А. А. Добровольский¹, В. Н. Кочемасов¹, А. Р. Сафин^{1, 2, 3 Д}

¹ООО "Радиокомп", Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

³Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

[™]arsafin@gmail.com

Аннотация

Введение. Современные прецизионные радиотехнические системы предъявляют жесткие требования к качеству используемых источников опорных сигналов. Существует несколько различных способов построения источников опорных сигналов СВЧ-диапазона – СВЧ-автогенераторов (АГ). Одно из перспективных направлений развития таких автогенераторов – АГ с частотозадающими элементами на поверхностных акустических волнах.

Цель работы. Обзор мировых достижений в области разработки частотозадающих элементов на поверхностных акустических волнах (ПАВ) и АГ на их базе.

Материалы и методы. Отбор материала для анализа и обобщения проводился по доступным публикациям в общеизвестных технических журналах, рекламным проспектам и сайтам фирм – производителей устройств на ПАВ за последние 30 лет методом сравнения. Критериями отбора материала для обзора являлись: низкие значения спектральной плотности мощности частотных флуктуаций формируемого сигнала, наличие виброзащиты, наличие термостата, миниатюрность, оригинальность конструкции.

Результаты. В статье проведен анализ особенностей различных способов построения АГ СВЧ-диапазона. Показано, что достижение наилучших значений спектральной плотности мощности частотных флуктуаций в АГ с частотозадающими элементами на ПАВ возможно только при применении двухпортовых резонаторов. Проведен анализ основных технических характеристик термостатированных виброустойчивых АГ.

Заключение. Несмотря на большое количество различных фирм-производителей (более двадцати) на мировом рынке и многообразие различных моделей АГ с частотозадающими элементами на ПАВ (более ста различных моделей), всего две фирмы выпускают автогенераторы, стойкие к воздействию внешних вибраций и акустических шумов.

Ключевые слова: автогенератор, поверхностные акустические волны, спектральная плотность мощности частотных флуктуаций, G-чувствительность

Для цитирования: Автогенераторы на поверхностных акустических волнах (обзор) / В. А. Лойко, А. А. Добровольский, В. Н. Кочемасов, А. Р. Сафин // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 3. С. 6–21. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-6-21

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования: Грант РФФИ № 19-29-03015.

Статья поступила в редакцию 23.03.2022; принята к публикации после рецензирования 25.04.2022; опубликована онлайн 28.06.2022



Electrodynamics, Microwave Engineering, Antennas

Review article

Self-Oscillators Based on Surface Acoustic Waves (A Review)

Vitaliy A. Loiko^{1, 2}, Alexander A. Dobrovolsky¹, Victor N. Kochemasov¹, Ansar R. Safin ^{1, 2, 3}

¹"Radiocomp", Moscow, Russia

²National Research University "MPEI", Moscow, Russia

³Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Moscow, Russia

[™]arsafin@gmail.com

Abstract

Introduction. Modern precision radio systems impose stringent requirements on the quality of the reference signal sources used. Various approaches are used to create sources of reference signals in the microwave range – microwave self-oscillators (SO). A promising direction in the development of such SO is SO with frequency-setting elements based on surface acoustic waves (SAW).

Aim. A review of international achievements in the development of frequency-setting elements based on SAW and respective SO.

Materials and methods. The selection of materials for a comparative analysis and generalization was carried out using available sources published over the past 30 years in well-known engineering journals, advertising brochures and websites of the manufacturers of devices based on SAW. The selection criteria included low values of the power spectral density of the frequency fluctuations of the generated signal, the presence of vibration protection, the presence of a thermostat, as well as the miniaturization and originality of the design.

Results. Specific features of various methods used for constructing microwave oscillators were analyzed. It is shown that the achievement of the best values of the power spectral density of frequency fluctuations in SO with frequency-setting elements on SAW is possible only with the use of two-port resonators. An analysis of the main technical characteristics of temperature-controlled vibration-resistant SO was carried out.

Conclusion. Despite the large number of different manufacturers on the world market (more than 20 companies) and the variety of different models of oscillators with frequency-setting elements on SAW (more than a 100 different models), only two companies produce oscillators resistant to external vibrations and acoustic noise.

Keywords: self-oscillator, surface acoustic waves, power spectral density of frequency fluctuations, G-sensitivity

For citation: Loiko V. A., Dobrovolsky A. A., Kochemasov V. N., Safin A. R. Self-Oscillators Based on Surface Acoustic Waves (A Review). Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 6–21. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-6-21

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

Acknowledgment: RFBR grant no. 19-29-03015.

Submitted 28.03.2022; accepted 25.04.2022; published online 28.06.2022

Введение. Неотъемлемой частью любой современной радиотехнической системы является источник опорного сигнала – автогенератор (АГ). Предъявляемые к нему требования во многом определяются спецификой работы всей системы и спектром решаемых ею задач. В одних системах на первое место ставят массогабаритные показатели и энергопотребление, в других основной упор делается на качество формируемых сигналов и их временные характеристики. Наиболее жесткие требования к источникам опорных сигналов в части качества

формируемого сигнала предъявляются в системах связи, радионавигации, телеметрии, радиолокации и в измерительной технике.

В зависимости от способа стабилизации частоты АГ можно разделить на кварцевые генераторы, генераторы с резонаторами на поверхностных акустических волнах (ПАВ) (surface acoustic waves – SAW), генераторы на объемных резонаторах, генераторы с резонаторами на железо-иттриевом гранате (ЖИГ), генераторы на базе микроэлектромеханических систем (МЭМС), генераторы на квантовых ячейках, генераторы на лейкосапфировых резонаторах, оптоэлектронные генераторы и т. д. Каждому виду свойственны свои преимущества и недостатки. Так, например, наиболее высокостабильными АГ являются генераторы на основе квантовых ячеек (рубидиевых, цезиевых, водородных и т. д.). Долговременная стабильность частоты формируемого сигнала в таких генераторах колеблется в диапазоне $1.10^{-3} \dots 1.10^{-7}$ ppb¹ за сутки [1–3]. При этом формируемый сигнал, как правило, лежит в диапазоне частот 5...10 МГц и имеет относительно высокие значения спектральной плотности мощности частотных флуктуаций $L(\Delta f)$ на отстройках от несущей частоты Δf более сотен герц. Недостатками таких АГ является высокая (по сравнению с собственной стабильностью) чувствительность к температуре окружающей среды, внешним вибрациям и магнитным полям, что приводит к существенному усложнению их конструкции, увеличению массогабаритных показателей и, как следствие, накладывает существенные ограничения на их использование в авионике и мобильной технике [4, 5].

АГ на основе ЖИГ-резонаторов формируют СВЧ-сигналы частот от единиц до десятков гигагерц и могут иметь полосу перестройки до трех октав (т. е. отношение максимально возможной частоты сигнала, формируемого таким генератором, к минимально возможному значению частоты может достигать восьми). При этом они также чувствительны к изменениям температуры окружающей среды и к внешним магнитным полям, а значения спектральной плотности мощности частотных флуктуаций формируемого сигнала весьма невелики по сравнению с другими видами АГ [6, 7].

В этом же диапазоне находятся частоты СВЧ-сигналов, формируемых АГ на объемных резонаторах. Сигналы этих АГ в ряде случаев могут иметь относительно высокую стабильность частоты, а спектральная плотность мощности частотных флуктуаций формируемого

сигнала может достигать крайне низких значений по сравнению с другими видами АГ СВЧдиапазона. При этом они также чувствительны к изменениям внешней температуры окружающей среды [8].

АГ на диэлектрическом лейкосапфировом резонаторе также формируют СВЧ-сигналы частот от единиц до десятков гигагерц. На момент публикации настоящей статьи они имеют самую зарегистрированную спектральную низкую плотность мощности частотных флуктуаций в мире: так, например, при отстройке от несущей 1 кГц достигнуты значения -157 дБн/Гц на частоте 10 ГГц [9]. Существенная зависимость физических свойств материала резонатора от внешних механических воздействий и температуры, а также большие размеры требуют сложных и громоздких систем термостабилизации и виброзащиты. Указанные недостатки ограничивают применение таких АГ в мобильной технике, несмотря на рекордно низкие значения спектральной плотности мощности частотных флуктуаций формируемых сигналов.

Альтернативой АГ на лейкосапфировых резонаторах являются оптоэлектронные генераторы на волоконно-оптических линиях задержки, формирующие сигналы в диапазоне 1...100 ГГц со спектральной плотностью мощности частотных флуктуаций не хуже -147 дБн/Гц при отстройке от несущей 1 кГц на частоте 10 ГГц [9, 10]. Преимуществом таких АГ также является возможность их изготовления в интегральном исполнении. Несмотря на достоинства указанного вида АГ, они также подвержены влиянию температуры окружающей среды и механическим воздействиям, а в спектре выходного сигнала присутствует множество паразитных частот, что делает их преимущественно лабораторными. Серийно выпускаемые образцы обладают сравнительно худшими значениями спектральной плотности мощности частотных флуктуаций формируемых сигналов [11–14].

Несколько менее стабильными по сравнению с АГ на квантовых ячейках, но при этом наиболее распространенными среди всех типов АГ, являются АГ на кварцевых резонаторах. Формируемые ими сигналы занимают ВЧдиапазон, достигая частот 200...300 МГц. При этом они также чувствительны к изменениям

¹ Здесь и далее ppb от англ. parts per billion (частей на миллиард) или 1·10⁻⁹ о. е.

внешней температуры окружающей среды и к вибрациям, однако при применении определенных технических решений удается достичь достаточно высокой устойчивости к внешним воздействиям и низкой спектральной плотности мощности частотных флуктуаций вплоть до –190 дБн/Гц при отстройках от несущей более 100 кГц на частоте 100 МГц [15].

На настоящий момент наибольший интерес для применения в радиолокационной и измерительной технике представляет СВЧ-диапазон. Однако при умножении сигнала кварцевых ВЧгенераторов ухудшается спектральная плотность мощности частотных флуктуаций (при умножении сигнала частотой 100 МГц до 1000 МГц деградация составляет минимум 20 дБ).

Сравнение свойств рассмотренных типов АГ позволяет заключить, что наиболее перспективными являются АГ на ПАВ. С одной стороны, они формируют сигналы с частотой, относящейся к СВЧ-диапазону, с другой – по сравнению с другими представителями АГ СВЧ-диапазона обладают относительно высокими значениями как кратковременной, так и долговременной стабильности частоты формируемых сигналов. Кроме того, они обладают низкой спектральной плотностью мощности частотных флуктуаций (вплоть до -180 дБн/Гц) при отстройках от несущей более 100 кГц на частотах не менее 500 МГц [16-19]. Таким образом, используя АГ на ПАВ в СВЧ-диапазоне, удается достичь выигрыш на 5...10 дБ по уровню спектральной плотности мощности частотных флуктуаций над АГ на кварцевых резонаторах при умножении их выходного сигнала до СВЧ-диапазона, на отстройках от несущей частоты более 100 кГц. Однако рассматриваемым АГ присущи все недостатки, свойственные их ближайшим аналогам - кварцевым генераторам: высокая чувствительность к температуре окружающей среды и воздействию вибраций. Однако применение специальных конструктивных и схемотехнических решений позволяет значительно уменьшить их подверженность влиянию внешних факторов [19-21].

ПАВ-генераторы могут быть построены на однопортовых или двухпортовых резонаторах, а также на линиях задержки [22]. В табл. 1

представлены некоторые наиболее часто упоминаемые в публикациях указанные устройства, а также их основные параметры.

Частотные свойства однопортовых резонаторов на ПАВ и кварцевых резонаторов на объемных акустических волнах схожи, благодаря чему для построения генератора на ПАВрезонаторах используют традиционные схемы кварцевых генераторов. Эти схемы, как известно, по принципу построения делятся на трехточечные схемы (индуктивные и емкостные) и на АГ, где резонатор выступает в качестве последовательного колебательного контура. В качестве активного элемента таких АГ могут быть использованы транзисторы или туннельные диоды. Диапазон частотной перестройки трехточечных схем заключен между частотами последовательного и параллельного резонансов, в силу чего даже для сильных пьезоэлектриков (с коэффициентом электромеханической связи не менее 0.1), таких как ниобат лития, он составляет 0.1...0.2 % от номинального значения [22].

Схемы построения АГ на линиях задержки и на двухпортовых резонаторах на ПАВ идентичны в том смысле, что эти элементы включаются в цепь обратной связи АГ. Более того, поскольку они являются четырехполюсниками, то могут использоваться только в схемах АГ с трехполюсными активными элементами. Отличие между АГ этих типов заключается лишь в том, что линия задержки имеет потери, как правило, на 10...15 дБ больше, чем резонаторы (табл. 1), что требует нескольких каскадов усиления сигнала в таких схемах. Указанные обстоятельства, в свою очередь, приводят к усложнению схем АГ, снижению их стабильности и весьма большим значениям фазового шума [22].

Анализ мировой литературы. Как следует из анализа отечественной и зарубежной литературы, первые упоминания о генераторах на ПАВ-резонаторах и о перспективности развития указанного направления начали появляться в 1965–1970 гг. Понимая перспективность применения данного вида продукции в военной и коммерческой аппаратуре, большинство ведущих фирм-производителей и научноисследовательских институтов начали уделять все большее внимание проблемам улучшения Табл. 1. Основные параметры некоторых выпускаемых в настоящее время резонаторов и линий задержки на ПАВ Tab. 1. Main parameters of some currently produced SAW resonators and delay lines

Молон	Произродители /отрана	Номинальная частота,	Вносимые			
производитель/страна		МГц	потери, дБ			
Однопортовые резонаторы						
A144-430.0M1	∧ЭК Лизойи/РФ	430	0.5			
AE1474M-1064	АЭК Дизаин/1Ф	1064	3			
RT-400D	Бутно/РФ	400	0.9			
RT-1000D	Вугис/РФ	1000	1.5			
TC0527B	TALSAW/Tenneur	600	2			
TC0447A	ТАГ-ЗА W/ Таивань	904.3	2.2			
ESR390E	Almona Comparison/CIIIA	390	2			
ASR915E	Abracon Corparation/CIIIA	915	2.5			
RO2131D	Murata Manufacturing/Япония	314.35	2.5			
RSR-868.950-75-5035-TR	Raltron Electronics/CIIIA	868.950	2.0			
ACTR965/868 35 Advanced Crystal		868 35	22			
11011000/000100	Technology/Великобритания	000.55	2.2			
SR2442B	SAW Components/Германия	2442	1.5			
GSRS TC0556A	Golledge Electronics/Великобритания	1033.333	-			
R1901	Qualcomm/CIIIA	315	1.8			
SR5005	Vanlong Technology/CIIIA	915.5	2.2			
R43392	Geyer Electronic /Германия	433.92	1.5			
R868.35	SJK/Китай	868.35	2.1			
R922	SJK/Китай	922.625	1.5			
RO3144A-2	RFM Integrated/CIIIA	916.5	2.5			
SR3-1000	WTL/Китай	1000	1.5			
Двухпортовые резонаторы						
A174-500M1	А О.И. П Х/DФ	500	4.1			
A174-1532.25M1	АЭК Дизаин/РФ	1532.25	9.5			
RT-403D55-2	Галина / ВФ	403.55	4.9			
RT-1090D	Бутис/РФ	1090	10			
TD0116A		1090	10			
TD0125A	ТАІ-SA W/ Таивань	915	8.5			
NS-34R	EPSON ТОУОСОМ/Япония	8002500	6			
ACTQ963/868.0	Advanced Crystal	868	8			
ACTQ434/433.92	Technology/Великобритания	433.920	8			
SR434G	SAW Components/Германия	433.920	9			
SQ5002	Vanlong Technology/CIIIA	916.5	9			
R1000 SJK/Китай		1000	6			
Линии задержки						
A110-400M1		400	37			
AE5683H-881.5	АЭК Лизайн/РФ	881.5	20			
AE5683H-1960		1960	28			
MBC-1029	MBC-1029		40			
MBC-1004	Teledyne/CIIIA	900	40			
SDL74A		74	21.5			
SDL868A	SAW Components/I ермания	867.5	9			
101136C	Microsemi/CIIIA	1575	24.7			

таких характеристик АГ, как температурная и долговременная стабильность частот формируемого сигнала и снижение спектральной плотности мощности его частотных флуктуаций. Наряду с этим бурно развивается конструирование и повышение технологичности изготовления относительно простых и миниатюрных источников опорных сигналов СВЧдиапазона для телекоммуникационного и связного оборудования гражданского назначения. В 1979 г. в журнале "Зарубежная радиоэлектроника" вышла обзорная статья "Генерация и синтез частот с применением приборов на поверхностных акустических волнах", в которой опубликовано обобщение мировых достижений в данной области на тот момент [23]. В 1980–1996 гг. Т. Е. Parker, J. A. Greer, G. K. Montress, J. Callerame, D. Andres и др. опубликовали цикл статей, посвященный проблемам улучшения таких характеристик АГ на ПАВ-резонаторах, как спектральная плотность мощности частотных флуктуаций, чувствительность к вибрации, долговременная стабильность. Более того, в этот период появились первые упоминания о возможности достижения на частотах не менее 500 МГц при отстройках от несущей частоты более 100 кГц значений спектральной плотности мощности частотных флуктуаций ниже –180 дБн/Гц [16], что, безусловно, является значительным прогрессом, не оставляющим сомнений в перспективности применения АГ на ПАВ-резонаторах и достойным результатом по сей день. В рекламных проспектах и научных публикациях в журналах в период 1990-2005 гг. несколько десятков зарубежных фирм, таких как Andersen laboratories (CIIIA), Sawtek (CIIIA), Temex (Франция), Crystek Corporation (США), RF Monolithics (США), Rakon (Франция), Vectron (США), E2V (Великобритания) и т. д., предлагали свои АГ на ПАВ. Подавляющее большинство предложений касалось весьма миниатюрных и простых источников опорных сигналов на ПАВ, однако также были представлены более качественные экземпляры устройств, снабженных вибро- и акустозащитой, системой термостатирования, встроенным умножителем частоты, системой синхронизации с внешним сигналом и т. д. По мнению авторов настоящей статьи, осознание преимуществ более сложных АГ на ПАВ в военной технике (радиолокации) и разрешение проблем с использованием таких устройств в жестких условиях эксплуатации в совокупности с усложнением межгосударственных взаимоотношений привели к значительному снижению количества публикаций по данной теме и предложений на общемировом рынке в настоящее время.

Несмотря на весьма большой список как отечественных, так и зарубежных фирм - производителей акустоэлектронных устройств на ПАВ (табл. 1), востребованность и перспективность АГ на их основе как в военной технике, так и в различных областях гражданской продукции, на мировом рынке на сегодняшний день присутствует множество производителей относительно простых АГ на ПАВ (табл. 2) и всего несколько производителей, предлагающих более сложные и качественно лучшие в техническом плане -

частности, виброзащищенные) модели (в (табл. 3). Отметим, что обеспечить рекордно низкие значения спектральной плотности мощности частотных флуктуаций формируемых сигналов АГ на ПАВ возможно только при применении двухпортовых резонаторов, обладающих на резонансной частоте высокими значениями собственной добротности Q [24-26] и приемлемыми значениями вносимых потерь (табл. 1).

Признанным мировым лидером в производстве АГ не только на кварцевых резонаторах, но и на ПАВ является фирма Rakon, которая предлагает несколько десятков различных моделей генераторов [27], таких как термокомпенсированные кварцевые генераторы (temperature compensated crystal oscillators – TCXO) c частотой 1.25...375 МГц и температурной стабильностью 0.05...10 ppm²; термостатированные кварцевые генераторы (oven-controlled crystal oscillators – OCXO), в том числе ультрамалошумящие и высокостабильные, с частотой 10...130 МГц и температурной стабильностью 0.1...1000 ppb; миниатюрные нетермостатированные ПАВ-генераторы, управляемые напряжением (voltage controlled SAW oscillators -VCSO), с низким энергопотреблением (не более 200 мВт) в корпусе для поверхностного монтажа с номинальными частотами 800, 1000, 1600, 2000 МГц и относительно неплохими по сравнению с технически более сложными и дорогостоящими моделями собственного производства значениями спектральной плотности мощности частотных флуктуаций выходного сигнала (не хуже -170 дБн/Гц на частоте 1 ГГц при отстройке от несущей более 100 кГц); ультрамалошумящие термостатированные ПАВгенераторы (oven controlled SAW oscillators -OCSO), управляемые напряжением, и т. д., которые могут поставляться с системами виброзащиты, внешней/внутренней синхронизации, умножения частоты 320 МГц...10 ГГц и температурной стабильностью 1...3 ррт.

Рассмотрим особенности нескольких наиболее интересных представителей семейства OCSO фирмы Rakon с точки зрения электрических

² Здесь и далее ppm от англ. parts per million (частей на миллион) или 1·10⁻⁶ о. е.

		Спектральна	ая плотность		
		мошности	частотных	Лиапазон	ГС
Модель/ производитель	Номинальная	флуктуаци	ій, дБн/Гц,	рабочих	таоаритные размеры,
	частота, МГц	на отстройках		температур, °С	мм
		1 кГц	1 МГц	1 517	
LNO320B1/Rakon	320	-152	-180	0+50	95×76×23
LNO10000B3/Rakon	10 000	-115	-151	0+50	120×76×23
RSV2522/Rakon	1000	-115	-172	-40+85	22×25×5
RK600N/Rakon	800	-105	-170	-20+70	25×25×13
PE19XC7000/Pasternack	500	-100	-150	-30+70	50.8×38.1×15.24
PE19XC7004/ Pasternack	6000	-80	-135	-30+70	50.8×38.1×15.24
PE19XP5004/ Pasternack	500	-95	-145	-30+70	22.86×22.86×5.33
PE19XP5008/Pasternack	6000	-80	-130	-30+70	22.86×22.86×5.33
ГК261-С-ПВ1-2000/Элпа	2000	_95	-130	-50+65	142×52.2×23
ГПВ-2/Эппа	616	-100	-	-60+70	65×30×18.5
ГК141-С-ПВ10/Эппа	1260	-90	-125	-40 +65	76×53×23
HFSO800-5H/Synergy	800	-123	-172	-20 + 70	12 7×12 7×4 6
HESO2000-5TC/Synergy	2000	_112	-166	-40 + 85	19.05×19.05×4.2
NY13M09WA/NDK	1986 819	_97	_148	-10 +85	13 8×9 2×2 6
TS0032A/TAL-SAW	628 1737	-116	-170		13.7×9.4
EV-9000GB/Enson	2400	_95	-150	-20 +60	14×9×2.8
PS-701/Vectron	1000	_113	-155	_40 +85	7×5×2.5
PS-501/Vectron	1000		_159	-40 +85	14 4×9 5×4 9
VS-403/Vectron	5898		_140	-40 +85	19 9×13×5 9
CCSO-914X-1000/Crystek	1000	_115	_170	_40 +85	14 2×9 14×5 33
CVCSO-914SXT/Crystek	1600	_109	-165	-20 + 70	14 2×9 14×5 33
RSV18504/Gever	1850		_140	_40 +85	8×6×1.8
RSV925A/Gever	925	_80	_145	_40 +85	12 7×12 7×2 8
OCVCS0-1/IOD	800	_137	_167	-20 +60	25.4×22.0×13.2
MN725-0400 0000/API	400	109	160	55 +85	25.4×22.0×13.2
MN725-2500.0000/API	2500	07	1/18	55 +100	25.4×22.0×5.08
0T6258/0-TECH	1000	105	168	40 +85	15 0×15 0×3 8
VCSL7 800/Paltron	800	-105	155	40 +85	7 4×5 4×2 5
M602SDM/Penesos Electronics	1747 623	-98	-155	-40+85	7.4×3.4×2.5
MSO-1000/Murpau	1000	11/	172	-10+85	12 6×12 6×4
M630/Micro Networks	10.066	-114	130	-40+83	12.0×12.0×4
M600/Micro Networks	900	-03	-130	40 +85	18 5×10 5×0 4
CS A 21 622 08M/Conner Winfield	622.08	-104	-145	-40+83	14.22×11.68×3.56
VCS571/CTS Electronic Components	622.08	-105	-133	40 +85	7 52×5 18×2 69
NX72175001/Diodos Incorporated	022.08	-110	-145	-40+63	7.52^5.16^2.06
DT 700 000MDD T/TXC Comparation	700	_		10 +70	-
LO1081 2/DEM	1000		- 110	-10+70	/^3^1.0
HO1081-3/RFM	1090	-90	-110	-55+105	25.02×12.85×0.55
WI0/3-02-CAT/ID1	2499.22	-/3	<u> </u>	40 + 95	/.49×3.08×3.03
VC502488.32/SaWteK	2488.32	-90	-105	-40+83	19.03×19.03×3.81
8521/5/Triquint Semiconductor	800	-103	-108	-55+85	23.4×12.7×3.6
KC/USUS-L2/Kyocera	/00	-	- 172	0+/0	/×5×2
101662.103/Microsemi	600	-123	-173	-40+85	25.4×25.4×5.7

 $\mathit{Табл.}\ 2.$ Основные параметры некоторых выпускаемых в настоящее время АГ на ПАВ

.....

Tab. 2. Main parameters of some currently produced SAW generators

Табл. 3. Основные параметры некоторых выпускаемых в настоящее время виброзащищенных АГ на ПАВ *Tab. 3.* Main parameters of some currently produced vibration-proof SAW generators

Модель/ производитель	Номинальная частота, МГц	Спектральная плотность мощности частотных флуктуаций, дБн/Гц, на отстройках		Диапазон рабочих температур, °С	Габаритные размеры, мм ³
		1 кГц	1 МГц		
LNO320D1/Rakon	320	-152	-178	-40+80	70×70×35
LNO480D1/Rakon	480	-145	-180	-35+71	70×70×35
LNO500D1/Rakon	500	-142	-178	-40+70	70×70×35
LNO640D1/Rakon	640	-146	-172	-40+70	70×70×35
LNO1000D1/Rakon	1000	-135	-172	-40+70	70×70×35
E2V/Teledyne	600, 1200	_	_	—	-
АГ на ПАВ/АФ	896	-140	-172	-60+70	142×142×57

Автогенераторы на поверхностных акустических волнах (обзор) Self-Oscillators Based on Surface Acoustic Waves (A Review)



Рис. 1. Внешний вид OCSO LNO320B1 (а) и LNO320D1 (б) Fig. 1. Appearance of OCSO LNO320B1 (a) and LNO320D1 (b)

параметров: спектральной плотности мощности частотных флуктуаций, стабильности частоты формируемых сигналов, чувствительности к вибрации. Генераторы LNO320B1 и LNO320D1, управляемые напряжением (здесь и далее окончание "D1" в обозначении модели генератора Rakon означает виброзащищенное исполнение), представляют собой термостатированные ПАВгенераторы с номинальной частотой 320 МГц (рис. 1). Модификация LNO320B1 имеет более узкий диапазон рабочих температур (0...+50 °C) и температурную стабильность не хуже ± 1 ppm, а модель LNO320D1 имеет диапазон рабочих температур -40...+80 °С и температурную стабильность не хуже ±2.5 ppm. Последняя модель, благодаря наличию системы виброзащиты, имеет стойкость к воздействию внешних ударов и вибраций и обладает G-чувствительностью не более 1 ppb/g на частоте внешнего воздействия 10 Гц (g- ускорение свободного падения) и не более 0.14 ppb/g на частоте внешнего воздействия 100 Гц. Указанная модель также снабжена системой фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ) (внешней синхронизации), предназначенной для повышения температурной и долговременной стабильности частоты формируемого сигнала, которая может быть использована при наличии внешнего опорного сигнала частотой 10 МГц. Рассмотренные модели обладают весьма достойными значениями спектральной плотности мощности частотных флуктуаций формируемых сигналов по сравнению с лучшими мировыми аналогами (рис. 2).

виброзащищенного Для исполнения LNO320D1 нормирована чувствительность к внешней вибрации (рис. 3).



Рис. 2. Спектральная плотность мощности частотных флуктуаций моделей LNO320B1 и LNO320D1 фирмы Rakon: 1 – без внешней синхронизации; 2-с внешней синхронизацией

Fig. 2. Phase noise spectral density of the Rakon LNO320B1 and LNO320D1 models: 1 - without external synchronization; 2 - with external synchronization



Рис. 3. Спектральная плотность мощности частотных флуктуаций модели LNO320D1 фирмы Rakon без воздействия и под воздействием внешней вибрации: 1 – без вибрации; 2 – при наличии внешней вибрации (типовые значения); 3 – при наличии внешней вибрации (гарантированные значения); 4 – спектральная плотность ускорения

Fig. 3. Phase power spectral density of the Rakon model LNO320D1 without and under the influence of external vibration: 1 – without vibration; 2 – under the influence of external vibration (typical values); 3 - under the influence of external vibration (guaranteed values);

4 - acceleration spectral density plot

Автогенераторы на поверхностных акустических волнах (обзор) Self-Oscillators Based on Surface Acoustic Waves (A Review)

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 3. С. 6–21 Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 6–21

Компания Rakon предлагает еще несколько АГ на ПАВ, управляемых напряжением, в виброзащищенном исполнении, аналогичных модели LNO320D1: LNO480D1, LNO500D1, LNO640D1, LNO1000D1, отличающихся друг от друга диапазоном рабочих температур и номинальной выходной частотой.

Еще одной интересной моделью компании является АГ LNO10000B3 без виброзащиты, но с термостатом и встроенной системой синхронизации с внешним сигналом. Номинальная частота данного АГ составляет 10 ГГц благодаря встроенному умножителю частоты высокой кратности (кратность равна 20). Наряду с этим указанная модификация имеет достаточно узкий диапазон рабочих температур (0...+50 °C) и температурную стабильность не хуже ±2 ppm.

Еще одним зарубежным производителем АГ на ПАВ является компания E2V (Великобритания), представленная на мировом рынке единственным образцом (рис. 4), информации о котором в открытом доступе практически нет, так как компания позиционирует его как источник опорных колебаний военного назначения. Этот АГ работоспособен в широком диапазоне температур окружающей среды. Типичный диапазон формируемых частот составляет 600...1200 МГц. Он снабжен уникальной запатентованной системой виброзащиты, выходным усилителем, умножителем частоты и системой переключения выходной частоты [28].



Puc. 4. Внешний вид $A\Gamma$ на ПАВ компании E2V *Fig. 4.* Appearance of the SAW oscillator from E2V

На момент подготовки настоящей статьи в открытом доступе отсутствует информация о других зарубежных производителях термостатированных /виброзащищенных АГ на ПАВ.

С другой стороны, на мировом рынке имеются еще несколько десятков компаний, выпускающих миниатюрные нетермостатированные ПАВ-генераторы, управляемые напряжением, в корпусе для поверхностного монтажа (рис. 5), что объясняется их относительной простотой, технологичностью и, как следствие, дешевизной. Так, например, американская фирма Synergy Microwave Corporation выпускает линейку таких АГ на частоты 800, 1000, 1200, 1500, 1600, 2000 МГц [29, 30], которые



Рис. 5. Внешний вид миниатюрных АГ на ПАВ для SMD-монтажа фирм Synergy Microwave Corporation (a) и Nihon Dempa Kogyo (δ)

 Fig. 5. Appearance of a miniature SAW oscillator for SMD mounting by Synergy Microwave Corporation (a) and Nihon Dempa Kogyo (δ)

 также обладают рекордно низким энергопотреблением. При этом по сравнению с аналогами от Rakon эти АГ имеют спектральную плотность мощности частотных флуктуаций хуже приблизительно на 5...10 дБ. Другой, не менее известной, фирмой – производителем АГ на ПАВ является Vectron International, чья линейка насчитывает несколько десятков различных моделей в диапазоне частот от 120 МГц до 7 ГГц, опционально обладающих низкой чувствительностью к внешним вибрациям (не более 0.6 ppb/g), стойкостью к ударным воздействиям (до 20 000 g) и низким энергопотреблением [31].

АГ, аналогичные выпускаемым Synergy Microwave Corporation и Rakon, производит японская фирма Nihon Dempa Kogyo. Генераторы этой фирмы выпускаются в корпусе для поверхностного монтажа с возможностью выбора номинальной частоты ИЗ диапазона 1680...2200 МГц [32]. Однако спектральная плотность мощности частотных флуктуаций АГ японского производителя приблизительно на 20 дБ хуже аналогов от Rakon. Необходимо отметить ПАВ-генераторы на частоту 628.1737 МГц в корпусе для поверхностного монтажа, выпускаемые тайваньской фирмой TAI-SAW Technology Co. Ltd [33], показывающие относительно неплохие значения спектральной плотности мощности частотных флуктуаций (не хуже –170 дБн/Гц при отстройке от несущей более 1 МГц), что несколько уступает аналогам от Rakon и японской фирмы EPSON ТОУОСОМ, производящей АГ на двухпортовых ПАВ-резонаторах собственного производства (NS-34R), способных работать вплоть до частот 2.5 ГГц. При этом помимо малых габаритов и низкого энергопотребления в последних упомянутых генераторах удалось достичь спектральной плотности мощности частотных флуктуаций не хуже -165 дБн/Гц при отстройке от несущей более 1 МГц на частоте 2.4 ГГц [34].

Отдельное место среди АГ на ПАВ зарубежного производства занимает продукция американской фирмы Pasternack Enterprises, выпускающей линейку АГ на ПАВ с фиксированной выходной частотой из ряда 0.5, 1, 2, 4, 6 ГГц в унифицированном прочном алюминиевом корпусе (рис. 6) со встроенной системой синхро-



фирмы Pasternack Enterprises Fig. 6. Appearance of the oscillator on the SAW company Pasternack Enterprises

низации по внешнему эталонному сигналу частоты 10 или 100 МГц, не имеющих встроенной системы виброзащиты и термостатирования, однако способных функционировать в диапазоне рабочих температур от -30 до +70 °C и под воздействием внешних вибраций и ударов в соответствии с IAW MIL-STD-202 [35] (метод 213 (многократное ударное воздействие, амплитуда воздействия не более 50 g, длительность удара 11 мс \pm 10 %) и метод 204, условия "А" (широкополосная случайная вибрация, со среднеквадратическим значением ускорения $0.06 g^2/\Gamma$ ц в диапазоне 10...55 Гц, с последующим спадом 6 дБ/октаву)).

Достижения отечественной промышленности в области разработок АГ на ПАВ, по сравнению с общемировыми, на сегодняшний день выглядят довольно скромно, но при этом являются весьма достойными. Производством и изготовлением фильтров, резонаторов и линий задержки на ПАВ, в том числе с военной приемкой (ВП), занимаются такие отечественные предприятия, как 000 "АЭК Дизайн" (Санкт-Петербург), АО «НПП "Эталон"» (Омск), АО «НИТИ "Авангард"» (Санкт-Петербург), АО «НИИ "Элпа"» (Зеленоград). Однако по информации, имеющейся в открытом доступе, изготовлением АГ на ПАВ из указанного списка предприятий занимается только АО «НИИ "Элпа"».

Модельный AΓ, ряд выпускаемых АО «НИИ "Элпа"», включает в себя несколько



Puc. 7. Внешний вид отечественных АГ на ПАВ ГК261-С-ПВЗ (*a*) и ГПВ-2 (*б*), выпускаемых АО «НИИ "Элпа"» *Fig.* 7. Appearance of the domestic oscillator on the SAW GK261-S-PV3 (*a*) and GPV-2 (*б*), manufactured by Elpa Research Institute JSC

различных модификаций, отличающихся друг от друга выходной номинальной частотой формируемого сигнала, возможностью электронной регулировки выходной мощности, дополнительной встроенной системой ФАПЧ при наличии внешнего эталонного сигнала, видом приемки (ОТК или ВП), конструктивным исполнением и массогабаритными показателями [36]. Рассмотрим модельный ряд этой фирмы более подробно.

Генераторы серии ГК261-С-ПВ (рис. 7, а) выпускаются на одну выходную номинальную частоту из фиксированного ряда частот 1500, 1750, 2000 МГц, имеют выходную мощность 0.1...3.2 мВт при температуре окружающей среды 25 ± 5 °C, диапазон рабочих температур -50...+65 °C, спектральную плотность мощности частотных флуктуаций на частоте 1500 МГц не хуже –75 дБн/Гц при отстройке от несущей более 100 Гц и не хуже -130 дБн/Гц при отстройке от несущей более 10 кГц. Возможна ВП. Производитель позиционирует данные АГ как элементы стабилизации в системах радиолокации, радионавигации и связи.

Генератор ГПВ-2 (рис. 7, б) имеет выходную номинальную частоту 616 МГц, выходную мощность 1...5 мВт, диапазон рабочих температур –60...+70 °С, спектральную плотность мощности частотных флуктуаций не хуже –100 дБн/Гц при отстройке от несущей более 1000 Гц. Возможна ВП. Производитель позиционирует данный АГ как элемент стабилизации в аппаратуре специального назначения.

Генераторы ГК141-С-ПВ (1...10) могут иметь одну выходную номинальную частоту из ряда 1.08, 1.10, 1.12, 1.14, 1.16, 1.18, 1.20, 1.22, 1.24, 1.26 ГГц, выходную мощность 4.5...9 мВт, диапазон рабочих температур –40...+65 °С, спектральную плотность мощности частотных флуктуаций не хуже –90 дБн/Гц при отстройке от несущей более 1000 Гц и не хуже –125 дБн/Гц при отстройке от несущей более 10 кГц. Кроме того, указанная модель снабжена внутренней системой ФАПЧ от внешнего опорного генератора частотой 5 МГц. Ввиду того что данный АГ выполнен на импортной элементной базе, возможна поставка только с приемкой ОТК.

Несмотря на такие достоинства перечисленных моделей АГ, как широкий диапазон рабочих температур, герметичное исполнение, выполнение на отечественной элементной базе, относительно небольшие массогабаритные показатели, ВП, они сильно уступают зарубежным образцам по одному из важнейших параметров – спектральной плотности мощности частотных флуктуаций.

Наиболее перспективным АГ с точки зрения электрических характеристик и стойкости к внешним климатическим и механическим воздействиям как на отечественном, так и на мировом рынке, информация о котором имеется в открытом доступе, является АГ на ПАВ СВЧ-диапазона, разработанный в АО «НПЦ "Алмаз-Фазотрон"» (Саратов) (рис. 8) [20].

Указанная модель АГ имеет двойной термостат, что позволяет обеспечить малое время выхода на рабочий режим (не более 180 с) в диапазоне рабочих температур от -60 до +70 °C, и при необходимости может иметь встроенный умножитель частоты. Применение в этой модели буферного усилителя и малошумящего стабилизатора напряжения повышает качество формируемого СВЧ-сигнала. Номинальная частота формируемого сигнала 896 МГц, пределы электронной перестройки частоты не менее ± 25 ppm, выходная мощность не менее 18 дБм, Ø142×57 MM^2 габаритные размеры [20].

Автогенераторы на поверхностных акустических волнах (обзор) Self-Oscillators Based on Surface Acoustic Waves (A Review)



Puc. 8. Внешний вид отечественного АГ на ПАВ от АО «НПЦ "Алмаз-Фазотрон"» (верхняя крышка не показана) *Fig. 8.* Appearance of the domestic oscillator on the SAW from JSC "NPC "Almaz-Fazotron" (top cover not shown)

На рис. 9 представлены достигнутые значения спектральной плотности мощности частотных флуктуаций. Неоспоримыми преимуществами указанной модели являются, во-первых, выполнение полностью на отечественной элементной базе, что делает возможным ее поставку с ВП, и, во-вторых, наличие системы пассивной виброзащиты, которая совместно с особой технологией крепления ПАВ-резонатора позволяет сохранять виброустойчивость при воздействии внешних вибраций с распределением, характерным для авиационной техники [20].

Рассмотренный образец по заявленным электрическим характеристикам не уступает лучшим образцам АГ на ПАВ от Rakon. Также в публикации [20] упоминается о проработке методов электронной компенсации деградации спектральной плотности мощности частотных флуктуаций под воздействием внешней вибра-





Fig. 9. Power spectral density of the phase noise of a SAW oscillator from JSC "NPC "Almaz-Fazotron" (output frequency 896 MHz)

ции, что, бесспорно, является перспективным направлением совершенствования АГ на ПАВ.

Заключение. В заключение отметим, что, несмотря на многообразие производителей акустоэлектронных устройств (в частности, ПАВ-резонаторов) на мировом рынке, подавляющее большинство АГ на ПАВ являются весьма простыми и дешевыми источниками опорных сигналов исключительно гражданского назначения, неспособных функционировать в жестких условиях эксплуатации. Мировой рынок АГ на ПАВ, способных сохранять свои рабочие характеристики, в первую очередь низкий уровень спектральной плотности мощности частотных флуктуаций, в широком диапазоне рабочих температур, при воздействии внешних вибраций и акустических шумов, а также обладающих относительно малым временем готовности, представлен на данный момент всего двумя производителями.

Авторский вклад

Лойко Виталий Анатольевич – подготовка текста статьи и рисунков. Добровольский Александр Александрович – подготовка текста статьи. Кочемасов Виктор Неофидович – подготовка текста статьи. Сафин Ансар Ризаевич – подготовка текста статьи.

Author's contribution

Vitaliy A. Loiko, preparation of the text and figures for the paper. Alexander A. Dobrovolsky, preparation of the text for the paper. Victor N. Kochemasov, preparation of the text for the paper. Ansar R. Safin, preparation of the text for the paper.

Автогенераторы на поверхностных акустических волнах (обзор) Self-Oscillators Based on Surface Acoustic Waves (A Review)

Список литературы

1. Характеристики долговременной нестабильности водородных стандартов частоты и времени нового поколения / С. И. Донченко, И. Ю. Блинов, И. Б. Норец, Ю. Ф. Смирнов, А. А. Беляев, Н. А. Демидов, Б. А. Сахаров, В. Г. Воронцов // Измерительная техника. 2020. № 1. С. 35–38. doi: 10.32446/0368-1025it.2020-1-35-38

2. Рубидиевый стандарт частоты с импульсной лазерной накачкой: состояние и перспективы / С. А. Волков, Г. В. Герасимов, Н. О. Майкапар, Д. С. Сидоренков // Тр. Ин-та прикладной астрономии РАН. 2019. № 49. С. 17–22. doi: 10.32876/ApplAstron.49.17-22

3. Васильев В. И. Повышение точности, стабильности и надежности квантового дискриминатора пассивного водородного стандарта частоты: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ННИПИ "Кварц". Н. Новгород, 2011. 26 с. URL: https://viewer. rusneb.ru/ru/000199_000009_004852758?page=1&rota te=0&theme=white (дата обращения 13.05.2022)

4. Столяров И. И. Направления развития устройств синтеза сигнала резонатора в квантовых стандартах частоты с лазерной накачкой и детектированием // Радионавигация и время: тр. СЗРЦ концерна ВКО "Алмаз-Антей". 2021. № 7(15). С. 98–104.

5. Петров А. А. Методы улучшения метрологических характеристик квантовых стандартов частоты: дис. ... канд. физ.-мат. наук / AO РИРВ. СПб., 2021. 145 URL: c. http://iairas.ru/synopsises/petrovaa_disser.pdf (дата обращения 06.05.2022)

6. Ferrite-Based Microwave Oscillators / V. M. Gevorkyan, V. N. Kochemasov, A. R. Safin, A. V. Chenakin / 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecom-munications (SYNCHROIN-FO). Kaliningrad, 30 June–2 July 2021. Piscataway: IEEE, 2021. doi: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021. 9488394

7. Горевой А. В. Маломощные источники непрерывных сигналов СВЧ для измерительной техники: дис. ... канд. техн. наук / ТУСУР. Томск, 2017. 118 с. URL: https://postgraduate. tusur.ru /system/file_copies/files/000/000/384/original/Диссерт ация.pdf (дата обращения 13.05.2022)

8. Геворкян В. М., Кочемасов В. Н. Объемные диэлектрические резонаторы – основные типы, характеристики, производители. Ч. 1 // Электроника: наука, технология, бизнес. 2016. № 4. С. 62–76.

9. Борцов А. А. Лазерные оптоэлектронные генераторы с накачкой кванторазмерными лазерными диодами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / НИУ МЭИ. Москва, 2022. 40 с. URL: https://mpei.ru/diss/Lists/FilesAbstracts/538-Автореферат.pdf (дата обращения 13.05.2022)

10. Перестраиваемый спин-волновой оптоэлектронный СВЧ-генератор монохроматического сигнала / А. Б. Устинов, А. А. Никитин, В. В. Витько, Б. А. Калиникос // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2016. Т. 1, № 1. С. 338–342.

11. Improving thermal stability of optoelectronic oscillators / M. Kaba, H.-W. Li, A. S. Daryoush, J.-P. Vilcot, D. Decoster, J. Chazelas, G. Bouwmans, Y. Quiquempois, F. Deborgies // IEEE Microwave Magazine. 2006. Vol. 7, iss. 4. P. 38–47. doi: 10.1109/MMW.2006.1663988

12. An Ultra-Low Phase-Noise 20-GHz PLL Utilizing an Optoelectronic Voltage-Controlled Oscillator / A. Bluestone, D. T. Spencer, S. Srinivasan, D. Guerra, J. E. Bowers, L. S. Theogarajan // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2015. Vol. MTT-63, iss. 3. P. 1046–1052. doi: 10.1109/TMTT.2015.2397890

13. OEwaves, Inc. URL: https://www.oewaves.com/ ultra-wideband (дата обращения 13.05.2022)

14. Белкин М., Лопарев А. Оптоэлектронный генератор – первое практическое устройство СВЧоптоэлектроники // Электроника: наука, технология, бизнес. 2010. № 6. С. 62–70.

15. Ultra low noise VHF crystal oscillators / Pascall Electronics. URL: http://pascall.ru/pdfs/OCXOF.pdf (дата обращения 30.01.2022)

16. Montress G. K., Parker T. E., Andres D. Review of SAW Oscillator Performance // 1994 Proc. of IEEE Ultrasonics Symp., Cannes, France, 31 Oct.– 3 Nov. 1994. Piscataway: IEEE, 1994. P. 43–54. doi: 10.1109/ULTSYM.1994.401550

17. Bernardo R. P. SAW Voltage-controlled Oscillators // Microwave J. 2002. Vol. 45, iss. 9. P. 166–177.

18. Tatopoulos X. Compact Ultra-low Noise SAW Oscillator with reduced g-sensitivity for Radar applications // 2014 Intern. Radar Conf. Lille, France, 13–17 Oct. 2014. Piscataway: IEEE, 2014. P. 1–3. doi: 10.1109/RADAR.2014.7060383

19. Chomiki M. SAW Oscillators fly on Airborne Radars // Microwaves and RF. 2010. Vol. 49, № 6. P. 23–25.

20. Добровольский А. А., Лойко В. А. Сверхмалошумящий ПАВ-генератор СВЧ-диапазона на отечественной элементной базе для жестких условий эксплуатации // СВЧ-электроника. 2019. № 3. С. 14–18.

21. Lam C. S. Integration of SAW and BAW Technologies for Oscillator Applications // Intern. Workshop on SiP/Soc Integration of MEMS and Passive Components with RF ICs. Chiba, Japan, 2 March 2004. 39 p. URL: http://www.txccorp.com/download/tech_paper/2004-IWSIMPCRFIC-1-English.pdf (дата обращения 06.05.2022)

22. Дворников А. А., Огурцов В. И., Уткин Г. М. Стабильные генераторы с фильтрами на поверхностных акустических волнах. М.: Радио и связь, 1983. 136 с.

23. Кочемасов В. Н. Генерация и синтез частот с применением приборов на поверхностных акустических волнах // Зарубежная радиоэлектроника. 1979, № 1. С. 96–132.

24. Montress G. K., Parker T. E. Design Techniques for Achieving State-of-the-art Oscillator Per-

formance // 44th Annual Symp. on Frequency Control. Baltimore, USA, 23–25 May 1990. Piscataway: IEEE, 1990. P. 522–535. doi: 10.1109/FREQ.1990.177540

25. Кревский М. А., Коробков Г. М., Свешников Б. В. Анализ фазовых шумов опорных источников высокостабильных сигналов на основе ПАВ-резонаторов // Материалы XVII координационного семинара по CBЧ-технике, Н. Новгород, 6–8 сент. 2011. С. 72. URL: https://docplayer.com/26272166-Materialy-xviikoordinacionnogo-nauchno-tehnicheskogo-seminara-posvch-tehnike.html (дата обращения 13.05.2022)

26. Малогабаритные малошумящие СВЧгенераторы на основе резонаторов на поверхностных акустических волнах / И. Г. Анцев, Г. А. Сапожников, А. П. Алексеенко, Д. Н. Кербников // Электронная техника. Сер. 1: СВЧ-техника. 2013. № 3. С. 98–100.

27. Rakon. URL: https://www.rakon.com (дата обращения 30.01.2022)

28. Teledyne e2v. URL: https://www.teledynee2v.com (дата обращения 30.01.2022)

29. Synergy Microwave Corporation. URL: https://www.synergymwave.com (дата обращения 30.01.2022)

30. Poddar A. K., Rohde U. L. Adaptive modecoupled harmonically tuned ultra low phase noise VCSO circuits // 2011 Joint Conf. of the IEEE Intern. Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS). San Francisco, USA, 2–5 May 2011. Proc. Piscataway: IEEE, 2011. doi: 10.1109/FCS.2011.5977780

31.VectronInternational.URL:https://www.vectron.com/products/vcso.aspx(датаобращения 17.02.2022)

32. Nihon Dempa Kogyo. URL: https://www.ndk.com/en/products/index.html (дата обращения 30.01.2022)

33. TAI-SAW Technology Co. Ltd. URL: https://www.taisaw.com/en/product.php (дата обращения 30.01.2022)

 34.
 EPSON
 TOYOCOM.
 URL:

 https://www5.epsondevice.com/en/information/technical_in
 fo/pdfsawres_sawosc.pdf (дата обращения 30.01.2022)
 Sawosc.pdf (дата обращения 30.01.2022)

35. MIL-STD-202G URL: https://nepp.nasa.gov/ DocUploads/1F6AB74B-4517-4AD0-A34813268E75B8EB/ MIL-STD-202.pdf (дата обращения 13.05.2022)

36. НИИ "ЭЛПА". URL: https://www.elpapiezo.ru/ Datasheets/GK261-C-PV.pdf (дата обращения 30.01.2022)

Информация об авторах

Лойко Виталий Анатольевич – инженер по специальности "Радиотехника" (Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., 2013), аспирант кафедры формирования и обработки радиосигналов Национального исследовательского университета (НИУ) "МЭИ", начальник отдела в ООО "Радиокомп". Автор 19 научных работ. Сфера научных интересов – стабилизация частоты колебаний, генераторы на поверхностных акустических волнах, виброзащита.

Адрес: ООО "Радиокомп", пр. Волгоградский, д. 42, Москва, 109316, Россия E-mail: Lvitalika@yandex.ru

Добровольский Александр Александрович – инженер по специальности "Полупроводники и диэлектрики" (Ленинградский ордена Ленина политехнический институт им. М. И. Калинина, 1976), инженерразработчик ООО "Радиокомп". Автор более 40 научных работ. Сфера научных интересов – кварцевые генераторы, генераторы на поверхностных акустических волнах, виброзащита.

Адрес: ООО "Радиокомп", пр. Волгоградский, д. 42, Москва, 109316, Россия E-mail: dobr.burdin@gmail.com

Кочемасов Виктор Неофидович – кандидат технических наук по специальности "Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения" (Московский энергетический институт, 1976), генеральный директор ООО "Радиокомп". Автор более 150 научных работ, включая четыре монографии и более сорока авторских свидетельств на изобретения. Сфера научных интересов – радиотехника, устройства формирования и обработки радиосигналов, фильтры СВЧ, синтезаторы частот и сигналов.

Адрес: ООО "Радиокомп", пр. Волгоградский, д. 42, Москва, 109316, Россия E-mail: kochemasovdv@gmail.com

Сафин Ансар Ризаевич – кандидат технических наук по специальности "Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения" (2014), доцент, заведующий кафедрой формирования и обработки радиосигналов НИУ "МЭИ", старший научный сотрудник ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, начальник отдела в ООО "Радиокомп". Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – радиофизика и электроника, физика магнитных явлений, спинтроника.

Адрес: ООО "Радиокомп", пр. Волгоградский, д. 42, Москва, 109316, Россия E-mail: arsafin@gmail.com https://orcid.org/0000-0001-6507-6573

References

1. Donchenko S. I., Blinov I. Y., Norets I. B., Smirnov Y. F., Belyaev A. A., Demidov N. A., Sakharov B. A., Vorontsov V. G. The Long-Term Instability of the New Generation Hydrogen Masers. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques]. 2020, no. 1, pp. 35–38. doi: 10.32446/0368-1025it.2020-1-35-38 (In Russ.)

2. Volkov S. A., Gerasimov G. V., Maikapar N. O., Sidorenkov D. S. Rubidium Clock with Pulsed Laser Pumping: State and Prospects. Transactions of the Institute of Applied Astronomy RAS. 2019, no. 49, pp. 17– 22. doi: 10.32876/ApplAstron.49.17-22 (In Russ.)

3. Vasil'ev V. I. Improving the Accuracy, Stability and Reliability of the Quantum Discriminator of the Passive Hydrogen Frequency Standard. Available at: https://viewer.rusneb.ru/ru/000199_000009_004852758 ?page=1&rotate=0&theme=white (accessed 13.05.2022)

4. Stolyarov I. I. The Development Ways of Resonator Signal Synthesis Devices in Quantum Frequency Standards with Laser Pumping and Detecting. Radio Navigation and Time. 2021, no. 7(15), pp. 98–104. (In Russ.)

5. Petrov A. A. Methods for Improving the Metrological Characteristics of Quantum Frequency Standards. Available at: http://iairas.ru/synopsises/petrovaa_disser.pdf (accessed 06.05.2022)

6. Gevorkyan V. M., Kochemasov V. N., Safin A. R., Chenakin A. V. Ferrite-Based Microwave Oscillators. 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). 30 June–2 July 2021, Kaliningrad. Piscataway, IEEE, 2021. doi: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021. 9488394

7. Gorevoy A. V. Low-Power Sources of Continuous Microwave Signals for Measuring Equipment. Available at: https://postgraduate.tusur.ru/system/file_copies/files/000/ 000/384/original/Диссертация.pdf (accessed 13.05.2022)

8. Gevorkyan V., Kochemasov V. Cavity Dielectric Resonators – Basic Types, Characteristics, Manufacturers. Part 1. Electronics: STB. 2016, no. 4, pp. 62–76. (In Russ.)

9. Bortsov A. A. Laser Optoelectronic Oscillators Pumped by Quantum-Well Laser Diodes. Available at: https://mpei.ru/diss/Lists/FilesAbstracts/538-ABTOpedepar.pdf (accessed 13.05.2022)

10. Ustinov A. B., Nikitin A. A., Vit'ko B. B., Kalinikos B. A. Tunable Spin-Wave Optoelectronic SHF Monochromatic Signal Generator. Electronics and Microelectronics SHF. 2016, vol. 1, no. 1, pp. 338–342. (In Russ.)

11. Kaba M., Li H-W., Daryoush A. S., Vilcot J-P., Decoster D., Chazelas J., Bouwmans G., Quiquempois Y., Deborgies F. Improving Thermal Stability of Opto-Electronic Oscillators. IEEE Microwave Magazine. 2006, vol. 7, iss. 4, pp. 38–47. doi: 10.1109/MMW.2006.1663988

12. Bluestone A., Spencer D. T., Srinivasan S., Guerra D., Bowers J. E., Theogarajan L. S. An Ultra-Low Phase-Noise 20-GHz PLL Utilizing an Optoelectronic Voltage-Controlled Oscillator. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2015, vol. MTT- 63, iss. 3, pp. 1046–1052. doi: 10.1109/TMTT. 2015.2397890

13. OEwaves, Inc. Available at: https://www.oewaves.com/ultra-wideband (accessed 13.05.2022)

14. Belkin M., Loparev A. Optoelectronic Generator. Practically the First Microwave Optoelectronic Device. Electronics: STB. 2010, no. 6, pp. 62–70. (In Russ.)

15. Ultra low noise VHF crystal oscillators. Pascall Electronics. Available at: http://pascall.ru/ pdfs/OCXOF.pdf (accessed 30.01.2022)

16. Montress G. K., Parker T. E., Andres D. Review of SAW Oscillator Performance. 1994 Proc. of IEEE Ultrasonics Symp., 31 Oct.–3 Nov. 1994, Cannes, France. Piscataway, IEEE, 1994, pp. 43–54. doi: 10.1109/ULTSYM.1994.401550

17. Bernardo R. P. SAW Voltage-controlled Oscillators. Microwave Journal. 2002, vol. 45, iss. 9, pp. 166–177.

18. Tatopoulos X. Compact Ultra-low Noise SAW Oscillator with reduced g-sensitivity for Radar applications. 2014 Intern. Radar Conf. 13–17 Oct. 2014, Lille, France. Piscataway, IEEE, 2014, 3 p. doi: 10.1109/ RADAR.2014.7060383

19. Chomiki M. SAW Oscillators fly on Airborne Radars. Microwaves and RF. 2010, vol. 49, no. 6, pp. 23–25.

20. Dobrovol'skii A. A., Loiko V. A. Ultra-Low-Noise Microwave SAW Generator Based On Domestic Element Base For Harsh Operating Conditions. Microwave Electronics. 2019, no. 3, pp. 14–18. (In Russ.)

21. Lam C. S. Integration of SAW and BAW Technologies for Oscillator Applications. Available at: http://www.txccorp.com/download/tech_paper/2004-IWSIMPCRFIC-1-English.pdf (accessed 06.05.2022)

22. Dvornikov A. A., Ogurtsov V. I., Utkin G. M. Stabil'nye generatory s fil'trami na poverkh-nostnykh akusticheskikh volnakh [Stable Generators with Filters on Surface Acoustic Waves]. Moscow, Radio i svyaz', 1983, 136 p. (In Russ.)

23. Kochemasov V. N. Generation and Synthesis of Frequencies Using Devices Based on Surface Acoustic Waves. Foreign Radio Electronics. 1979, no. 1, pp. 96–132. (In Russ.)

24. Montress G. K., Parker T. E. Design Techniques for Achieving State-of-the-art Oscillator Performance. 44th Annual Symp. on Frequency Control. 23–25 May 1990, Baltimore, USA. Piscataway, IEEE, 1990, pp. 522–535. doi: 10.1109/FREQ.1990.177540

25. Krevskiy M. A., Korobkov G. M., Sveshnikov B. V. Phase Noise Analysis of Reference Sources of Highly Stable Signals Based on SAW Resonators. Available at: https://docplayer.com/26272166-Materialy-xvii-koordinacionnogo-nauchno-tehnicheskogo-seminara-po-svchtehnike.html (accessed 13.05.2022)

26. Antsev I. G., Sapozhnikov G. A., Alekseenko A. P., Kerbnikov D. N. Small-sized Low-Noise Microwave Generators Based on Surface Acoustic Wave Resonators. Electronic Equipment. Series 1: Microwave Technology. 2013, no. 3, pp. 98–100. (In Russ.)

Автогенераторы на поверхностных акустических волнах (обзор) Self-Oscillators Based on Surface Acoustic Waves (A Review) 27. Rakon. Available at: https://www.rakon.com (accessed 30.01.2022)

28. Teledyne e2v. Available at: https://www.teledyne-e2v.com (accessed 30.01.2022)

29. Synergy Microwave Corporation. Available at: https://www.synergymwave.com (accessed 30.01.2022)

30. Poddar A. K., Rohde U. L. Adaptive mode-coupled harmonically tuned ultra low phase noise VCSO circuits. 2011 Joint Conf. of the IEEE Intern. Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS). 2–5 May 2011, San Francisco, USA. Proc. Piscataway, IEEE, 2011. doi: 10.1109/FCS.2011.5977780

31. Vectron International. Available at: https://www.vectron.com/products/vcso.aspx (accessed 17.02.2022)

32. Nihon Dempa Kogyo. Available at: https://www.ndk.com/en/products/index.html (accessed 30.01.2022)

33. TAI-SAW Technology Co. Ltd. Available at: https://www.taisaw.com/en/product.php (accessed 30.01.2022)

34. EPSON TOYOCOM. Available at: https://www5.epsondevice.com/en/information/technic al_info/pdfsawres_sawosc.pdf (accessed 30.01.2022)

35. MIL-STD-202G Available at: https://nepp.nasa.gov/ DocUploads/1F6AB74B-4517-4AD0-A34813268 E75B8EB/MIL-STD-202.pdf (accessed 13.05.2022)

36. ELPA. Available at: https://www.elpapiezo.ru/ Datasheets /GK261-C-PV.pdf (accessed 30.01.2022)

Information about the authors

Vitaliy A. Loiko, engineer, specialty "Radio Engineering" (Saratov State Technical University n. a. Yu. A. Gagarin, 2013), postgraduate student of the Department of Formation and Processing of Radio Signals (FORS) of the National Research University (NRU) MPEI, head of the department of Radiocomp LLC. The author of 19 scientific papers. Area of expertise: vibration frequency stabilization, surface acoustic wave generators, vibration protection. Address: Radiocomp LLC, 42, Volgogradsky Ave., Moscow 109548, Russia E-mail: Lvitalika@yandex.ru

Alexander A. Dobrovolsky, engineer, specialty "Semiconductors and dielectrics" (Leningrad Polytechnic Institute n. a. M. I. Kalinin, 1976), development engineer of LLC "Radiocomp". The author of more than 40 scientific papers. Area of expertise: quartz generators, generators on surface acoustic waves, vibration protection. Address: Radiocomp LLC, 42, Volgogradsky Ave., Moscow 109548, Russia E-mail: dobr.burdin@gmail.com

Victor N. Kochemasov, Cand. Sci. (Eng.) in the specialty "Radio engineering including television systems and devices" (1976), General Director of Radiocomp LLC. Author of over 150 scientific papers, including four monographs and over forty copyright certificates for inventions. Area of expertise: radio engineering, devices for the generation and processing of radio signals, microwave filters, synthesizers of frequencies and signals. Address: Radiocomp LLC, 42, Volgogradsky Ave., Moscow 109548, Russia E-mail: kochemasovdv@gmail.com

Ansar R. Safin, Cand. Sci. (Eng.) in the specialty "Radio engineering including television systems and devices" (2014), head of the department of radio signal generation and processing, NRU "MPEI", senior researcher at the Institute of Radio Technologies and Electronics of the Russian Academy of Science Named after V. A. Kotelnikov, head of the department of Radiocomp LLC. The author of more than 50 scientific papers. Area of expertise: radio-physics and electronics, physics of magnetic phenomena, spintronics.

Address: Radiocomp LLC, 42, Volgogradsky Ave., Moscow 109548, Russia E-mail: arsafin@gmail.com

https://orcid.org/0000-0001-6507-6573

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 3. С. 22–38 Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 22–38

Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов УДК 621.396.96 https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-3-22-38

Оригинальная статья

Новый алгоритм оценки вектора скорости цели в РСА на основе согласованного фильтра Меллина

А. А. Монаков⊠

Институт радиотехники, электроники и связи, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

⊠ a monakov@mail.ru

Аннотация

Введение. Получение радиолокационного изображения (РЛИ) и измерение вектора скорости движущейся цели в радиолокаторах с синтезированной апертурой (РСА) является одной из ключевых задач. Явление миграции сигнала цели по элементам разрешения по дальности является причиной низкого качества РЛИ. Традиционные методы компенсации миграций, которые успешно применяются для получения РЛИ неподвижных объектов, не дают нужного качества в случае применения в обработке сигналов движущейся цели. В настоящее время известны алгоритмы решения поставленной задачи. Однако большинство из них использует оптимизационные процедуры поиска оценок неизвестных параметров, что в значительной степени затрудняет их реализацию. Исключением из этого множества является LvD-алгоритм, который для построения РЛИ использует двукратное применение преобразования "замкового камня". LvD-алгоритм не только не использует сложных процедур поиска оценок, но и позволяет строить РЛИ цели в координатах "продольная скорость", что делает задачу оценки составляющих скорости цели чрезвычайно простой. В то же время двукратное применение преобразования "замкового камня", которое использует интерполяцию принятого сигнала, увеличивает нагрузку вычислителя.

Цель работы. Разработка альтернативного алгоритма оценки вектора скорости и построения РЛИ движущейся цели в РСА бокового обзора без использования оптимизационных процедур поиска на основе применения согласованного фильтра Меллина (СФМ).

Материалы и методы. Полученный алгоритм основан на свойствах инвариантности интегрального преобразования Меллина к масштабу сигнала и использует для оценки составляющих скорости цели согласованный фильтр Меллина.

Результаты. В статье приведен синтез алгоритма построения РЛИ движущейся цели, в основании которого лежит применение согласованного фильтра Меллина. Дан анализ LvD-алгоритма, который позволил оптимальным образом выбрать коэффициент масштабирования при реализации КТ-преобразования. Проведено математическое моделирование СФМ и LvD-алгоритмов, которое показало их одинаковое качество. Оба алгоритма при одинаковых сценариях моделирования дают эффективные оценки составляющих вектора скорости движущейся цели при отношении сигнал/шум большем –10 дБ.

Заключение. Предлагаемый алгоритм построения РЛИ может быть использован при разработке РСА для обнаружения и оценки вектора скорости движущейся цели.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, миграции по дальности, радиолокационное изображение движущейся цели, преобразование "замкового камня", LvD-распределение, согласованный фильтр Меллина

Для цитирования: Монаков А. А. Новый алгоритм оценки вектора скорости цели в РСА на основе согласованного фильтра Меллина // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 3. С. 22–38. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-22-38

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 13.03.2022; принята к публикации после рецензирования 15.04.2022; опубликована онлайн 28.06.2022



Radio Electronic Facilities for Signal Transmission, Reception and Processing

Original article

An Algorithm for Estimating the Velocity of a Moving Target Based on Mellin Matched Filter

Andrey A. Monakov ⊠

Institute of Radio Technique, Electronics and Communication Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia

⊠ a monakov@mail.ru

Abstract

Introduction. Construction of the radar image of a moving target and estimation of its velocity in synthetic aperture radars (SAR) presents a relevant research problem. The low quality of radar imaging is frequently related to the phenomenon of range cell migration (RCM). Conventional methods for RCM compensation, which are successfully used to obtain radar images of stationary targets, fail to provide the required quality when applied to moving targets. At present, a number of algorithms are used to solve this problem. However, the majority of them employ optimization procedures when searching for estimates of unknown parameters, which fact greatly complicates their implementation. An exception is the LvD algorithm, which implements double keystone transform to construct a radar image without using complex estimate search procedures. Radar images are constructed in the coordinates "longitudinal velocity – lateral velocity", which facilitates estimation of the target velocity components.

Aim. Development of an alternative algorithm based on the Mellin matched filter (MMF) for estimating the velocity and constructing the radar image of a moving target in a side-looking SAR.

Materials and methods. The derived algorithm is based on the invariance of the integral Mellin transform to the signal scale and uses the MMF to estimate the target velocity components.

Results. An algorithm for constructing the radar image of a moving target based on the MMF was synthesized. An analysis of the LvD algorithm showed its capacity for selecting the optimum scale factor when implementing a second KT. The conducted computer simulation of the MMF and LvD algorithms showed their equal accuracy. Under the same simulation scenarios, both algorithms yield effective estimates of the velocity components of a moving target when the signal-to-noise ratio is greater than -10 dB.

Conclusion. The proposed algorithm for constructing a radar image can be used in SAR systems designed for detection and velocity estimation of a moving target.

Keywords: synthetic aperture radar, range cell migration, radar image of a moving target, keystone transform, Lv's distribution, Mellin matched filter

For citation: Monakov A. A. An Algorithm for Estimating the Velocity of a Moving Target Based on Mellin Matched Filter. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 22–38. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-22-38

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

Submitted 13.03.2022; accepted 15.04.2022; published online 28.06.2022

Введение. Получение радиолокационных изображений (РЛИ) и измерение параметров движущихся целей является в настоящее время одной из ключевых проблем в теории радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА). Использование обычных алгоритмов синтезирования апертуры при обработке сигнала движущейся цели не дает требуемого качества РЛИ, которое в этом случае получается расфокусированным и смещенным относительно истинного положения цели. Основной причиной этого является миграция сигнала цели по элементам разрешения по дальности, причем вследствие априорного незнания собственной скорости цели традиционные методы компенсации миграции, такие как RDA (Range– Doppler Algorithm) [1–4], WA (Wavenumber Algorithm) [5–8], CSA (Chirp Scaling Algorithm) [9–13], ECS (Extended Chirp Scaling Algorithm) [14], FSA (Frequency Scaling Algorithm) [15, 16], не дают нужного результата.

Предложенный в [17, 18] алгоритм "замкового камня" занимает особое место среди алгоритмов компенсации миграции. Этот алгоритм,

Новый алгоритм оценки вектора скорости цели в PCA на основе согласованного фильтра Меллина23An Algorithm for Estimating the Velocity of a Moving Target Based on Mellin Matched Filter23

использующий масштабирование "медленного" времени путем интерполяции принятого сигнала, получил в научно-технической литературе название КТ-алгоритма (Keystone Transform) первого порядка. В [19, 20] были предложены варианты КТ-алгоритма, не требующие применения интерполяционных методов при масштабировании "медленного" времени. Это позволило значительно упростить и ускорить его реализацию. Успешное применение КТ-алгоритма дало начало поискам новых эффективных алгоритмов обработки сигналов, позволяющих компенсировать миграции сигнала движущейся цели. Однако все варианты КТ-алгоритма дают качественное РЛИ движущейся цели только при условии, что кривизна фронта принимаемой волны мала. В случае когда цель движется, кривизной волнового фронта нельзя пренебречь. Поэтому приходится дополнительно проводить оценку и компенсацию квадратического члена мгновенной фазы принимаемого сигнала, который к тому же зависит не только от "медленного" времени, но и от "дальномерной" частоты. В [17] для решения этой задачи была предложена специальная процедура поиска на основе решения оптимизационной задачи, которая хотя и дает необходимый результат, но в значительной степени усложняет и замедляет синтез РЛИ. Для того чтобы облегчить процедуру оценки квадратического члена фазы, в [21] был предложен КТ-алгоритм второго порядка, который позволяет сделать квадратический член зависящим только от "медленного" времени. Однако и этот алгоритм требует оценки, но уже линейного члена в разложении фазы сигнала, который после применения интерполяции по "медленному" времени начинает зависеть от "дальномерной" частоты. Эта задача хотя и является менее сложной, но все равно требует дополнительных вычислительных затрат. Кроме того, оценка и компенсация квадратического члена фазы сигнала по-прежнему остаются актуальными. Так, в [22, 23] для ее решения предлагается использовать оценку мгновенной частоты сигнала путем применения адаптивного однополюсного фильтра (Adaptive Notch Filter). В [24, 25] (см. также работы, цитируемые в этих статьях) рассматривается возможность использования специальных алгоритмов оцени-

вания полиномиальных коэффициентов в разфазы принимаемого ложения частотномодулированного сигнала, которые хотя и являются достаточно эффективными, но требуют при реализации больших вычислительных затрат. В [26] принцип масштабирования сигнала по "медленному" времени, использованный в КТ-алгоритме, был применен для масштабирования по "азимутальной" (доплеровской) частоте. Синтезированный DKT-алгоритм (Doppler Keystone Transform) позволяет получить разложение фазы сигнала на компоненты, которые зависят раздельно от дальномерной и азимутальной частот. Однако после этой факторизации для получения РЛИ движущейся цели по-прежнему требуется оценка и компенсация квадратической фазовой ошибки.

В последнее время внимание специалистов привлекли алгоритмы синтеза РЛИ и оценки параметров движения цели на основе ТF-представления (Time-Frequency Representation – TFR) принятого сигнала или распределения его энергии на плоскости "время-частота". Базисом для этих алгоритмов является теория линейных и квадратических преобразований (распределений) [27, 28]. В рассматриваемую группу входят алгоритмы, использующие преобразование Вигнера-Вилля (Wigner-Ville Distribution – WVD) [29–31], преобразование Радона-Вигнера (Radon-Wigner Transform - RWT) и Вигнера–Хафа (Wigner–Hough Transform WHT) [32, 33], оконное преобразование Фурье (Short Time Fourier Transform - STFT) [28, 34], дробное преобразование Фурье (Fractional Fourier Transform – FrFT) [35, 36]. TF-представления сигнала позволяют получить информацию об изменении его частотного состава во времени. Именно поэтому алгоритмы, основанные на ТF-представлениях, оказались весьма эффективными при обработке сигналов РСА. Однако и в этой группе алгоритмов существует необходимость решать достаточно сложные задачи оптимизации при поиске оценок неизвестных параметров. Например, при обработке сигналов РСА часто встречающейся задачей является оценка скорости изменения мгновенной частоты линейной частотной модуляции (ЛЧМ) сигнала, для решения которой обычно применяются преобразования Радона-Вигнера и Вигнера-Хафа.

24 Новый алгоритм оценки вектора скорости цели в РСА на основе согласованного фильтра Меллина An Algorithm for Estimating the Velocity of a Moving Target Based on Mellin Matched Filter

В [37-41] было предложено новое квадратическое преобразование ЛЧМ сигнала, названное LvD-распределением (Lv's Distribution), по-видимому, по имени одного из авторов указанных работ. LvD-распределение, как и все квадратические распределения, основано на преобразовании параметрической симметричной мгновенной автокорреляционной функции (Parametric Symmetrical Instantaneous Autocorrelation Function – PSIAF) сигнала. Алгоритм с использованием LvD-распределения имеет существенные преимущества перед другими алгоритмами оценки параметров движущейся цели в системах РСА:

1. Поскольку PSIAF не зависит от квадратического члена в разложении фазы сигнала PCA, отпадает необходимость в оценке и компенсации квадратической фазовой ошибки.

2. В алгоритме дважды используется КТ-алгоритм: для компенсации миграций по дальности и для факторизации билинейного члена в разложении фазы сигнала. Это позволяет получить РЛИ цели простым двухмерным преобразованием Фурье.

3. РЛИ движущейся цели строится в координатной системе CFCR (Centroid Frequency – Chirp Rate) на плоскости "средняя частота – скорость изменения мгновенной частоты", что позволяет очень просто оценивать компоненты вектора скорости цели.

В соответствии с [37–41] LvD-алгоритм показал отличные результаты при оценке составляющих вектора скорости цели. Однако двукратное использование интерполяции при реализации КТ-преобразований увеличивает вычислительную сложность LvD-алгоритма. Кроме того, концепция LvD-алгоритма менялась авторами от статьи к статье. Некоторые элементы синтеза алгоритма и выбора его параметров не были достаточно освещены в указанных публикациях. Поэтому целесообразно подробно рассмотреть LvD-алгоритм и определить его основные свойства.

Анализ показывает, что те отличия, которые наблюдаются между излученным и принятым РСА сигналами в случае наблюдения движущейся цели, могут быть отнесены к изменениям масштаба излучаемого сигнала. Поэтому для обработки принятого сигнала полезным может быть использование методов, основанных на преобразовании Меллина, основным свойством которого является инвариантность амплитудного спектра Меллина к масштабным изменениям сигнала [42]. В частности, можно предположить, что использование согласованного фильтра Меллина, свойства которого были исследованы в [43, 44], позволит построить РЛИ движущейся цели и оценить составляющие ее вектора скорости.

Целью настоящей статьи является разработка прямого алгоритма оценки вектора скорости и построения РЛИ движущейся цели в РСА бокового обзора без использования оптимизационных процедур поиска на основе применения согласованного фильтра Меллина (СФМ). В статье решаются следующие задачи:

1. Анализ LvD-алгоритма.

2. Синтез прямого алгоритма построения РЛИ движущейся цели на плоскости "продольная скорость – поперечная скорость" с использованием СФМ.

3. Сравнительный анализ качества синтезированного алгоритма и LvD-алгоритма.

Принятый сигнал. Пусть РСА излучает импульсный ЛЧМ-сигнал

$$s(t) = g(t) \exp\left[i\left(\omega_0 t + \frac{v}{2}t^2\right)\right], \ 0 \le t \le T_p,$$

где g(t) – огибающая импульса, длительность которого равна T_p ; ω_0 – несущая частота; v – скорость изменения мгновенной частоты. Допустим, что цель, находящаяся в точке (x_0, y_0) в момент времени t = 0, движется равномерно и прямолинейно, и вектор ее скорости равен $\mathbf{U} = \hat{\mathbf{x}}U_x + \hat{\mathbf{y}}U_y$, где $\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}}$ – орты прямоугольной системы координат *XOY*, начало отсчета *O* которой совпадает с положением фазового центра антенны РСА в момент времени t = 0, ось *OX* направлена вдоль вектора скорости носителя РСА **V**, а ось *OY* – вдоль оси антенны (рис. 1). Тогда в текущий момент времени tрасстояние между фазовым центром антенны и целью будет равно

$$R(t) = \sqrt{(x_0 + U_x t - Vt)^2 + (y_0 + U_y t)^2}$$

25

Новый алгоритм оценки вектора скорости цели в PCA на основе согласованного фильтра Меллина An Algorithm for Estimating the Velocity of a Moving Target Based on Mellin Matched Filter



Puc. 1. Наблюдение движущейся цели в PCA *Fig. 1.* Observation of a moving target in SAR

Принятый сигнал после преобразования частоты и согласованной фильтрации будет равен

$$ss(t,\tau) = \dot{\rho}g\left[\tau - \frac{2R(t)}{c}\right] \exp\left[-i\frac{2\omega_0}{c}R(t)\right],$$
$$0 \le \tau \le T_r, \ 0 \le t \le T_D,$$

где $\dot{\rho}$ – комплексная амплитуда принятого сигнала; g – огибающая сигнала на выходе согласованного фильтра; c – скорость света; τ – "быстрое" время; t – "медленное" время; T_r – период повторения РСА; T_D – интервал когерентного накопления.

Сигнал $ss(t, \tau)$ удобно переписать, введя две новые переменные:

— поперечную дальность x = Vt вместо "медленного" времени t;

– продольную дальность $y = c\tau/2$ вместо "быстрого" времени τ .

Здесь и далее для обозначения сигналов будем придерживаться следующих обозначений: первая литера соответствует поперечной дальности х ("медленному" времени) или поперечному (азимутальному) волновому числу $K = 2\Omega/c$ (доплеровской частоте Ω); вторая – продольной дальности у ("быстрому" времени) или продольному (дальномерному) волновому числу $k = 2\omega/c$ (дальномерной частоте ω); строчные литеры *s* – сигналу по соответствующей дальности, заглавные S – спектру по соответствующему волновому числу. Тогда в новых переменных сигнал $ss(t, \tau)$ запишется в виде

$$ss(x,y) = \dot{\rho}g[y - R(x)]\exp[-ik_w R(x)],$$

$$0 \le y \le L, \ 0 \le x \le D,$$

где $k_w = 2\omega_0/c$ – волновое число; $L = cT_r/2$ – ширина кольца дальностей; $D = VT_D$ – длина синтезируемой апертуры. Осуществим над принятым сигналом преобразование Фурье по продольной дальности:

$$sS(x,k) = \int_{0}^{L} ss(x,y) \exp[-iky] dy =$$
$$= \dot{\rho}G(k) \exp[-i(k_{w}+k)R(x)],$$
$$|k| \le \frac{\Delta\omega}{c}, \ 0 \le x \le D,$$

где k – продольное волновое число; G(k) – спектр сигнала g(y); $\Delta \omega = vT_p$ – девиация частоты (полоса) излученного сигнала.

Предположим, что ширина кольца дальностей L и длина апертуры D намного меньше, чем расстояние до ближней границы области наблюдения R_{\min} , т. е. $L, D \ll R_{\min}$. Тогда для R(x) будет справедливо следующее разложение:

$$R(x) = \sqrt{(x_0 + u_x x - x)^2 + (y_0 + u_y x)^2} =$$

= $\sqrt{(R_0 + \beta x)^2 + (\gamma x)^2} \approx R_0 + \beta x + \frac{\gamma^2}{2R_0} x^2,$

где $u_x = U_x/V$ и $u_y = U_y/V$ – относительные скорости перемещения цели вдоль координатных осей *OX* и *OY*; параметры

$$\beta = (u_x - 1)\sin\theta_0 + u_y\cos\theta_0;$$

$$\gamma = (u_x - 1)\cos\theta_0 - u_y\sin\theta_0$$

характеризуют продольную и поперечную скорости движения цели относительно линии ее визирования; $R_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$ и $\theta_0 = \operatorname{arctg}(y_0/x_0)$ – начальные дальность и угловая координата цели.

Тогда функция sS(x,k) может быть записана в виде

$$sS(x,k) = \dot{\rho}G(k)\exp\left\{-i\left[\left(k_{w}+k\right)R_{0}+\right.\right.\right.$$
$$\left.+\beta\left(k_{w}+k\right)x+\frac{\gamma^{2}}{2R_{0}}\left(k_{w}+k\right)x^{2}\right]\right\};$$
$$\left.|k| \le \frac{\Delta\omega}{c}, \quad 0 \le x \le D.$$

Рассмотрим информационный и физический смысл каждого из членов, стоящих в по-

 ²⁶ Новый алгоритм оценки вектора скорости цели в РСА на основе согласованного фильтра Меллина An Algorithm for Estimating the Velocity of a Moving Target Based on Mellin Matched Filter

казателе полученного фазора. Первый член $(k_w + k)R_0$ соответствует задержке принятого сигнала, поскольку при возврате к продольной дальности у получающийся сигнал будет задержан на R_0 . Второй член $\beta(k_w + k)x$ несет информацию об относительной продольной скорости перемещения В и угловой координате θ₀ цели. Присутствие произведения kx свидетельствует о наличии миграции сигнала по дальности, в результате которой происходит дефокусировка РЛИ цели. Наконец, третий член $\gamma^2 (k_w + k) x^2 / (2R_0)$ несет информацию о поперечной скорости у и угловой координате θ₀ цели. Этот член соответствует квадратичной фазовой ошибке, которая также ведет к дефокусировке РЛИ.

Таким образом, обработка принятого сигнала с целью получения сфокусированного РЛИ и оценки вектора скорости цели должна осуществляться так, чтобы сохранить всю полезную информацию, содержащуюся в принятом сигнале, и одновременно компенсировать все факторы, вызывающие дефокусировку РЛИ.

В статье рассматриваются два алгоритма обработки принятого сигнала, которые основаны на преобразовании параметрической симметричной мгновенной автокорреляционной функции (Parametric Symmetrical Instantaneous Autocorrelation Function – PSIAF):

$$\chi(x, \Delta x; k) = sS(x + \Delta x, k)sS^*(x - \Delta x, k) =$$
$$= |\dot{\rho}|^2 |G(k)|^2 \exp\left[-2i(k_w + k)\Delta x \left(\beta + \frac{\gamma^2}{R_0}x\right)\right],$$
$$|k| \le \frac{\Delta \omega}{c}.$$

Поскольку сумма $(x + \Delta x)$ и разность $(x - \Delta x)$ должны одновременно удовлетворять условиям

$$\begin{cases} 0 \le x + \Delta x \le D; \\ 0 \le x - \Delta x \le D, \end{cases}$$

введенные переменные *x* и Δx оказываются взаимно зависимыми и должны удовлетворять следующим условиям:

$$\begin{aligned} |\Delta x| &\leq x \leq D - |\Delta x|;\\ \Delta x \in [-D/2, D/2]. \end{aligned} \tag{1}$$

Область изменения переменных x и Δx , которая определена неравенствами (1), является носителем функции $A = \operatorname{supp} \chi(\Delta x, x; k)$. Эта область представляет собой квадрат с диагональю, равной D, одна из вершин которого находится в начале координат плоскости ($\Delta x, x$), а противоположная ей – в точке (0, D).

Компенсируем миграции по дальности, используя КТ-преобразование [17, 18]. Для этого сделаем замену

$$\Delta x \to \frac{k_w}{k_w + k} \Delta x', \tag{2}$$

где $\Delta x'$ – новая переменная. Поскольку $k_w \gg |k|$, область изменения $\Delta x'$ примерно совпадает с областью изменения переменной Δx . Последнее очень важно, так как КТ-преобразование (2) требует интерполяции функции $\chi(x, \Delta x; k)$. В результате получим

$$\chi(x,\Delta x;k) = |\dot{\rho}|^2 |G(k)|^2 \exp\left[-2ik_w \Delta x \left(\beta + \frac{\gamma^2}{R_0}x\right)\right],$$
$$|k| \le \frac{\Delta \omega}{2c}, \ (x,\Delta x) \in A,$$

где для новой переменной сохранено прежнее обозначение Δx .

Поскольку в полученном выражении для $\chi(x, \Delta x; k)$ от волнового числа k зависит только $|G(k)|^2$, проинтегрируем PSIAF по k. В результате можно переписать уравнение для PSIAF в виде

$$\chi(x,\Delta x) = 2\pi |\dot{\rho}|^2 E \exp\left[-2ik_w \Delta x \left(\beta + \frac{\gamma^2}{R_0}x\right)\right],$$
$$(x,\Delta x) \in A, \tag{3}$$

где
$$E = (2\pi)^{-1} \int_{-\Delta\omega/(2c)}^{\Delta\omega/(2c)} |G(k)|^2 dk$$
 — энергия

сигнала g(y).

LvD-алгоритм. В полученном выражении переменные x и Δx по-прежнему не фактори-

Новый алгоритм оценки вектора скорости цели в PCA на основе согласованного фильтра Меллина27An Algorithm for Estimating the Velocity of a Moving Target Based on Mellin Matched Filter27

зованы. Для их факторизации в [39, 40] предложено осуществить замены:

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{a + \Delta x'}{2}; \\ x = \frac{ax'}{a + \Delta x'}, \end{cases}$$
(4)

где a > 0 – постоянная величина. Замена Δx не вызывает затруднений и сводится к сдвигу носителя PSIAF – области А – влево на а и ее растяжению вдоль оси Δx в 2 раза. Замена x осуществляется на основе КТ-преобразования, которое позволяет факторизовать переменные х и Δx . Первая замена имеет смысл только в том случае, если вторая замена примерно сохраняет область А, поскольку для интерполяции при КТ-преобразовании необходимо равенство областей изменения переменных х и х'. Это возможно, если $a \gg \max |\Delta x| = D/2$. Однако при этом условии становится невозможной замена $\Delta x \rightarrow \Delta x'$, поскольку сдвиг влево области Aпросто ведет к тому, что область значений $\Delta x'$ перемещается в окрестность точки $\Delta x' = -a$. Поэтому замена переменной Δx принципиального значения не имеет, и можно ограничиться заменой

$$x = \frac{ax'}{\Delta x},\tag{5}$$

где a > 0 – масштабный коэффициент, подлежащий выбору. Преобразование (5) формально не может больше называться преобразованием "замкового камня", так как область совместного изменения переменных Δx и x' значительно отличается от перевернутой равносторонней трапеции (прил. 1). Однако в данной статье сохранено название "КТ-преобразование" для замены (5), которое было использовано в [37–41].

Для реализации КТ-преобразования путем интерполяции необходимо, чтобы область значений переменной x' при любом Δx , которую обозначим как $A'(\Delta x)$, принадлежала области значений переменной x, т. е. должно выполняться $A'(\Delta x) \subset A(\Delta x)$, где $A(\Delta x)$ – сечение области A при $\Delta x = \text{const.}$ Как показано в прил. 1, невозможно добиться вложенности $A'(\Delta x) \subset A(\Delta x)$ ни при каких значениях a.

Однако можно выбрать такое значение этого параметра, которое обеспечивает максимальное перекрытие областей *A*' и *A*. Для этого необходимо, чтобы

$$a = \frac{8D}{27 + 5\sqrt{33}} \approx 0.14357D.$$

При таком значении масштабного коэффициента *а* удается получить следующее соотношение между площадями:

$$S(A' \cap A) \approx 0.48415 S(A),$$

где S(...) – площадь соответствующего множества. Следовательно, в лучшем случае только 48 % площади носителя PSIAF *A* будет использовано для построения РЛИ при замене (4).

В результате выполнения КТ-преобразования (4) PSIAF приобретает следующий вид:

$$\chi(x,\Delta x) = 2\pi |\dot{\rho}|^2 E \exp\left[-i\left(2k_w\beta\Delta x + 2k_w\frac{a\gamma^2}{R_0}x\right)\right],$$
$$(x,\Delta x) \in A',$$

где A' – преобразованная область A (прил. 1). Двухмерное прямое преобразование Фурье по переменным x и Δx дает РЛИ цели на плоскости (К,к)

$$I(\mathbf{K}, \kappa) = \iint_{A'} \chi(x, \Delta x) \exp\left[-i(\mathbf{K}x + \kappa \Delta x)\right] dx d(\Delta x) =$$
$$= C\delta\left(\mathbf{K} + 2\frac{ak_w}{R_0}\gamma^2\right)\delta(\kappa + 2k_w\beta),$$

где К и к – соответствующие волновые числа. Определив точку (K_m, κ_m), где РЛИ $|I(K, \kappa)|^2$ достигает максимального значения, можно вычислить оценки параметров β и γ :

$$\mathbf{B} = -\frac{\kappa_m}{2k_w}; \, \Gamma = \pm \sqrt{\frac{|\mathbf{K}_m| R_0}{2ak_w}}.$$

Выбор знака Г будет рассмотрен в следующем разделе.

Алгоритм на основе согласованного фильтра Меллина. Запишем (3) в виде

$$\chi(x,\Delta x) = 2\pi |\dot{\rho}|^2 E \exp\left[-2ik_w \beta \Delta x\right] \times$$
$$\times \exp\left[-2ik_w \left(\frac{\gamma^2}{R_0} \Delta x\right) x\right], \quad (x,\Delta x) \in A.$$

Для каждого значения переменной *х* второй экспоненциальный множитель, равный

$$z_{\mu}(x|\Delta x) = \exp\left[-i\gamma^{2}\left(\frac{2k_{w}}{R_{0}}\Delta x\right)x\right]$$
$$\frac{x_{\min}}{\gamma^{2}} \le x \le \frac{x_{\max}}{\gamma^{2}},$$

можно рассматривать как масштабированный сигнал

$$z_1(x|\Delta x) = \exp\left[-i\left(\frac{2k_w}{R_0}\Delta x\right)x\right],$$
$$x_{\min} \le x \le x_{\max},$$

где x_{\min} и x_{\max} – пределы изменения x, соответствующие данному ранее определению области A. Коэффициент масштабирования $\mu = \gamma^2$ и $z_{\mu}(x|\Delta x) = z_1(\mu x |\Delta x)$. Тогда для оценки μ можно воспользоваться согласованным фильтром Меллина, который был синтезирован в [42–44]. Основные свойства СФМ для удобства читателя представлены в прил. 2. М-спектр (преобразование Меллина) сигнала $z_{\mu}(x|\Delta x)$ равен

$$Z_{\mu}(\kappa|\Delta x) = \int_{\Delta x_{\min}/\mu}^{\Delta x_{\max}/\mu} z_{\mu}(x|\Delta x) \left(\frac{x}{D}\right)^{-i\kappa D-1} dx =$$
$$= \mu^{-1} \int_{\Delta x_{\min}}^{\Delta x_{\max}} z_{1}(x|\Delta x) \left(\frac{x}{\mu D}\right)^{-i\kappa D-1} dx =$$
$$= \mu^{i\kappa D} Z_{1}(\kappa|\Delta x),$$

где $Z_1(\kappa | \Delta x)$ – М-спектр сигнала $z_1(x | \Delta x)$.

Частотная характеристика СФМ равна $H(\kappa) = F^*(\kappa | \Delta x)$, где $F(\kappa | \Delta x)$ – преобразование Меллина сигнала $f(x | \Delta x) = \frac{x}{D} z_1(x | \Delta x)$ (прил. 2). Тогда М-спектр выходного сигнала СФМ равен

$$W_{\mu}(\kappa | \Delta x) = H(\kappa) Z_{\mu}(\kappa | \Delta x) =$$

$$= F^*(\kappa | \Delta x) Z_{\mu}(\kappa | \Delta x) =$$
$$= \mu^{i\kappa D} F^*(\kappa | \Delta x) Z_1(\kappa | \Delta x).$$

Выходной сигнал СФМ равен обратному преобразованию Меллина М-спектра $W(\kappa | \Delta x)$:

$$w_{\mu}(x|\Delta x) = \frac{1}{2\pi} \int W_{\mu}(\kappa|\Delta x) \left(\frac{x}{D}\right)^{i\kappa D} d\kappa =$$
$$= \frac{1}{2\pi} \int F^{*}(\kappa|\Delta x) Z_{1}(\kappa|\Delta x) \left(\frac{\mu x}{D}\right)^{i\kappa D} d\kappa = w_{1}(\mu x|\Delta x),$$

где $w_1(x|\Delta x)$ – выход СФМ при входном сигнале $z_1(x|\Delta x)$:

$$w_{1}(x|\Delta x) = \frac{1}{2\pi} \int W_{1}(\kappa|\Delta x) \left(\frac{x}{D}\right)^{i\kappa D} d\kappa =$$
$$= \frac{1}{2\pi} \int F^{*}(\kappa|\Delta x) Z_{1}(\kappa|\Delta x) \left(\frac{x}{D}\right)^{i\kappa D} d\kappa.$$

Важным свойством выбранного способа вычисления преобразования Меллина является то, что максимум сигнала $w_1(x|\Delta x)$ приходится на точку $x_1 = D$ при любом значении Δx . Таким образом, определив положение максимумов сигналов $w_{\mu}(x|\Delta x)$ и $w_1(x|\Delta x)$, которые соответствуют точкам x_{μ} и x_1 , можно оценить относительную поперечную скорость движения цели γ :

$$\Gamma_m = \pm \sqrt{x_1/x_\mu} = \pm \sqrt{D/x_\mu}.$$

РЛИ цели можно получить, осуществив фильтрацию PSIAF $\chi(x,\Delta x)$ в СФМ для каждого значения переменной Δx . В результате функция $\chi(x,\Delta x)$ будет равна

$$\chi(x,\Delta x) = |\dot{\rho}|^2 E \exp[-2ik_0\beta\Delta x] w_{\mu}(x|\Delta x),$$
$$(x,\Delta x) \in A.$$

Затем следует вычислить прямое преобразование Фурье по переменной Δx . Учитывая, что выходные сигналы СФМ $w_{\mu}(x|\Delta x)$ имеют максимум в точке $x_{\mu} = x_1/\gamma^2 = D/\gamma^2$ при любых значениях переменной Δx , прямое преобразование Фурье даст следующий результат:

Новый алгоритм оценки вектора скорости цели в PCA на основе согласованного фильтра Меллина29An Algorithm for Estimating the Velocity of a Moving Target Based on Mellin Matched Filter29

$$I(x,\kappa) = \int_{-D/2}^{D/2} \chi(x,\Delta x) \exp[-i\kappa\Delta x] d(\Delta x) =$$
$$= 2\pi |\dot{\rho}|^2 E w_{\mu}(x|\Delta x) \delta(\kappa + 2k_{\nu}\beta), (x,\kappa) \in C,$$

где $C = \{0 \le x \le D, |\kappa| \le 2\pi/D\}$ – область определения двухмерной функции $I(x, \kappa)$. Следовательно, оценка относительной продольной скорости β равна

$$\mathbf{B}_m = -\frac{\kappa_m}{2k_w},$$

где κ_m – значение волнового числа κ , при котором РЛИ $|I(x,\kappa)|^2$ имеет глобальный максимум.

Выбор знака оценки Г может быть сделан на основании предположения о скорости движения цели $U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}$ по отношению к скорости носителя РСА V. Предположим, что U < V, что эквивалентно неравенству $u_x^2 + u_y^2 < 1$. Выразим u_x и u_y через β и γ :

$$\begin{cases} u_x = \beta \sin \theta_0 + \gamma \cos \theta_0 + 1; \\ u_y = \beta \cos \theta_0 - \gamma \sin \theta_0. \end{cases}$$

Подставив эти выражения в последнее неравенство при $\beta = B_m$ и $\gamma = \Gamma_m$, получим

$$\left(\mathbf{B}_m + \sin \theta_0\right)^2 + \left(\Gamma_m + \cos \theta_0\right)^2 < 1.$$

Тогда знак перед квадратным корнем в уравнении для Γ_m должен быть выбран так, чтобы выполнялось это неравенство.

В заключение необходимо отметить, что ре-

ализация СФМ-алгоритма принципиально может быть организована без применения интерполяции в процессе обработки принятого сигнала. Для этого необходимо, во-первых, использовать версию КТ-алгоритма без интерполяции [19, 20] и, во-вторых, осуществить экспоненциальную дискретизацию принятого сигнала [45, 46].

Анализ алгоритмов. Анализ качества рассмотренных алгоритмов проведем методом математического моделирования со следующими сценарными параметрами:

– длина волны PCA $\lambda = 5.6$ см;

– ширина спектра импульса $\Delta f = 200 \text{ M}\Gamma$ ц;

- скорость движения носителя $V = 30 \, \text{м/c};$

— дальность до ближней границы зоны обзора РСА $R_{\min} = 10 \,\mathrm{кm};$

– длина синтезированной апертуры D=147.4 м;

 количество элементов разрешения по дальности *M* = 64;

– количество элементов разрешения по азимуту N = 2048;

– цель находится в точке $x_0 = 489.4$ м; $y_0 = 100134.5$ м;

- вектор скорости цели U=[4 м/с; 4 м/с];

– количество статистических испытаний *J* = 50.

На рис. 2 и 3 приведены сечения полученных двумя рассмотренными алгоритмами РЛИ

 $|I(B,\Gamma)|^2$ главными плоскостями, проходящими через максимум РЛИ. Переменные Γ и В являются результатом преобразований переменных К и к для LvD-алгоритма и переменных *x* и к для СФМ-алгоритма:





Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 3. С. 22–38 Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 22–38



Рис. 3. Сечения PSIAF для СФМ-алгоритма

Fig. 3. PSIAF sections for the MMF-algorithm

$$\begin{cases} \Gamma = \sqrt{\frac{|\mathbf{K}|R_0}{2ak_0}}, \ \mathbf{B} = -\frac{\kappa}{2k_0}, \quad \text{алг. LvD;} \\ \Gamma = \sqrt{\frac{D}{x}}, \quad \mathbf{B} = -\frac{\kappa}{2k_0}, \quad \text{алг. C}\Phi\mathbf{M}. \end{cases}$$

Как видно из рисунков, РЛИ в обоих случаях представляет собой дельтообразные пики, сосредоточенные в окрестности истинных значений оцениваемых относительных скоростей. Оценки параметров при отношении сигнал/шум (ОСШ) $q^2 = 0$ дБ и истинных значениях относительных скоростей $\beta = 0.090864$ И $\gamma = -0.87214$ равны соответственно: $\mathbf{B}_m=0.090785$ и $\Gamma_m=-0.87889$ для алгоритма LvD и $B_m = 0.090881$ на основе И $\langle k \rangle = \frac{1}{M} \sum_{j=-M/2}^{M/2-1} (k_w + k_j), \quad \Gamma_m = -0.87027$ для алгоритма на основе СФМ.

На рис. 4 приведены зависимости смещения и среднеквадратического отклонения (СКО) оценок от ОСШ q^2 , а также границы Крамера–Рао (ГКР) для СКО ошибок оценивания, которые построены на основании следующего уравнения для корреляционной матрицы ошибок:





Новый алгоритм оценки вектора скорости цели в PCA на основе согласованного фильтра Меллина 31 An Algorithm for Estimating the Velocity of a Moving Target Based on Mellin Matched Filter

где

$$\langle k \rangle = \frac{1}{M} \sum_{j=-M/2}^{M/2-1} (k_w + k_j);$$

$$\langle k^2 \rangle = \frac{1}{M} \sum_{j=-M/2}^{M/2-1} (k_w + k_j)^2;$$

$$\langle R_\beta \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{dR(x_n)}{d\beta};$$

$$\langle R_\gamma \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{dR(x_n)}{d\gamma};$$

$$\langle R_{\beta\beta}^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left[\frac{dR(x_n)}{d\beta} \right]^2;$$

$$\langle R_{\beta\gamma}^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{dR(x_n)}{d\beta} \frac{dR(x_n)}{d\gamma};$$

$$\langle R_{\gamma\gamma}^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left[\frac{dR(x_n)}{d\beta} \frac{dR(x_n)}{d\gamma} \right]^2,$$

 $k_j = 2\omega_j/c = 4\pi j/(cMT_s);$ T_s – период дискретизации сигнала по "быстрому" времени и $R(x_n) = \sqrt{(R_0 + \beta x_n)^2 + (\gamma x_n)^2}.$

Графики на рисунке свидетельствуют о том, что оба рассмотренные алгоритма имеют одинаковые характеристики. В области малых ОСШ, где $q^2 < -10$ дБ, наблюдаются аномальные ошибки оценивания, причиной которых является наличие нескольких локальных максимумов РЛИ. В области $q^2 \ge -10$ дБ РЛИ обоих алгоритмов имеет один глобальный максимум, и качество оценивания приближается к потенциально достижимому: оценки становятся несмещенными и эффективными. Существование области аномальных ошибок не является серьезным недостатком рассмотренных алгоритмов. Как показано в [43, 44], аномальные ошибки можно полностью исключить, если при оценке привлечь дополнительную априорную информацию. В случае оценки компонент вектора скорости цели это нетрудно сделать исходя из физических соображений, накладывая на область поиска всегда существующие на практике ограничения на значение модуля скорости цели.

Заключение. В статье предлагается новый алгоритм оценки вектора скорости движущейся цели в РСА бокового обзора. Алгоритм основан на вычислении параметрической симметричной мгновенной автокорреляционной функции сигнала и применении согласованного фильтра Меллина. Оценки составляющих вектора скорости цели соответствуют положению пика радиолокационного изображения цели, построенного в координатах "продольная скорость поперечная скорость". Алгоритм не требует при своей реализации процедур интерполяции в процессе обработки принятого сигнала и оптимизации при поиске оценок. В статье также дан подробный анализ LvD-алгоритма, который в настоящее время является одним из наиболее цитируемых алгоритмов для решения поставленной задачи. Сравнительный анализ предлагаемого алгоритма и LvD-алгоритма свидетельствует о близости их характеристик. Так, в результате математического моделирования в одинаковых сценарных условиях оба алгоритма показали несмещенность и эффективность оценок составляющих вектора скорости при ОСШ большем -10 дБ. Дальнейшие исследования будут посвящены вопросам практической реализации предлагаемого алгоритма и поиску варианта, способного качественно работать в условиях существования траекторных нестабильностей при движении носителя РСА.

Приложение 1. Выбор масштабного коэффициента *а*. Положим *a* > 0 и введем новые нормированные переменные

$$\Delta \xi = \frac{\Delta x}{a}; \ \xi = \frac{x}{a}; \ \xi' = \frac{x'}{a}; \ \delta = \frac{D}{a}$$

Область значений переменных Δξ и ξ, для которой сохраним обозначение *A*, равна

$$A = \left\{ \left(\Delta \xi, \xi \right) : \left| \Delta \xi \right| \le \xi \le \delta - \left| \Delta \xi \right| \right\}$$

(рис. 5). Определим область значений переменных $\Delta\xi$ и ξ' , для которой сохраним обозначение A'. Для этого в соответствии с (5) в последнем неравенстве сделаем замену $\xi = \xi' / \Delta \xi$:

ограничения на значение модуля ско-

$$A' = \left\{ \left(\Delta \xi, \xi' \right) : \left| \Delta \xi \right| \le \frac{\xi'}{\Delta \xi} \le \delta - \left| \Delta \xi \right| \right\}$$

³² Новый алгоритм оценки вектора скорости цели в РСА на основе согласованного фильтра Меллина An Algorithm for Estimating the Velocity of a Moving Target Based on Mellin Matched Filter



Fig. 5. Domains A and A'

или

$$A' = \left\{ \left(\Delta \xi, \xi' \right) : \begin{bmatrix} \Delta \xi \left(\delta + \Delta \xi \right) \le \xi' \le -\Delta \xi^2, \ \Delta \xi \le 0 \\ \Delta \xi^2 \le \xi' \le \Delta \xi \left(\delta - \Delta \xi \right), \ \Delta \xi \ge 0 \end{bmatrix} \right\}.$$

Область А' представлена на рис. 5.

Как видно из рис. 5, область A симметрична, а A' – асимметрична относительно вертикальных координатных осей ξ и ξ' , причем если $\xi \ge 0$ при любом $\Delta \xi$, то $\xi' \ge 0$ только при $\Delta \xi \ge 0$. Следовательно, для реализации второго КТ-преобразования в LvD-алгоритме можно использовать только часть области A', которая соответствует неотрицательным значениям $\Delta \xi$. Этот факт не имеет принципиального значения, поскольку PSIAF обладает свойством эрмитовой сопряженности по переменной Δx : $\chi(-\Delta x, x) = \chi^*(\Delta x, x)$. Поэтому КТ-преобразование можно реализовать только при $\Delta x \ge 0$.

При фиксированном значении $\Delta \xi \ge 0$ сечение $A(\Delta \xi) = \{\xi : \Delta \xi \le \xi \le \delta - \Delta \xi\}$, в свою очередь сечение $A'(\Delta \xi) = \{\xi' : \Delta \xi^2 \le \xi \le \Delta \xi (\delta - \Delta \xi)\}$. Поэтому, для того чтобы $A'(\Delta \xi) \subset A(\Delta \xi)$, должно одновременно выполняться $1 \le \Delta \xi$ и $\Delta \xi \le 1$, что возможно лишь в частном случае, когда $\Delta \xi = 1$. Следовательно, можно сделать следующие два вывода:

1. Точка $\Delta \xi = 1$, где соответствующие сечения множеств *A* и *A*' равны, должна принадлежать отрезку $[0, \delta]$.

2. Ни при каких вариантах выбора параметра a невозможно добиться того, чтобы $A' \subset A$.

Из первого вывода следует, что $\delta \ge 1$. Поэтому параметр *a* должен удовлетворять неравенству $a \le D$. Следствием того, что при любом $a A' \not\subset A$, является необходимость выбора такого значения *a*, которое обеспечивало бы максимальное перекрытие областей *A* и *A'* в области положительных значений $\Delta \xi$. Как следует из рис. 5, площадь множества $A' \cap A$ равна

$$S(A' \cap A) = \int_{0}^{1} [t(\delta - t) - t] dt + \int_{1}^{x} (\delta - t - t^{2}) dt =$$
$$= \delta \left(x - \frac{1}{2} \right) - \frac{x^{3}}{3} - \frac{x^{2}}{2} = \frac{2x^{3}}{3} - \frac{x}{2},$$

где $x = (\sqrt{1+4\delta} - 1)/2$ и, следовательно, $\delta = x(x+1).$

Введем целевую функцию $Q(x) = = S(A' \cap A)/S(A|\Delta \xi \ge 0)$, где $S(A|\Delta \xi \ge 0) = \delta^2/2$ – площадь области A при $\Delta \xi \ge 0$. Введенная целевая функция может быть представлена как функция переменной x:

$$Q(x) = \frac{2}{3} \frac{(4x^2 - 3)}{x(x+1)^2}.$$

Найдем значение x_{opt} , соответствующее ее максимуму. Несложно показать, что это значение является корнем уравнения

Новый алгоритм оценки вектора скорости цели в PCA на основе согласованного фильтра Меллина33An Algorithm for Estimating the Velocity of a Moving Target Based on Mellin Matched Filter33

$$4x^{3} - 4x^{2} - 9x - 3 = (2x+1)(2x^{2} - 3x - 3) = 0,$$

единственный положительный корень которого является искомым решением $x_{opt} = \frac{3 + \sqrt{33}}{4} \approx 2.1861$. При этом $Q(x_{opt}) \approx 0.4842$. Таким образом, в лучшем случае только 48 % носителя PSIAF могут быть использованы для реализации КТ-преобразования. Достигается этот результат при $a_{opt} = \frac{8D}{27 + 5\sqrt{33}} \approx 0.14357D$.

Приложение 2. Согласованный фильтр Меллина и его свойства. Свойства СФМ, определение которого было впервые дано в [42], вытекают из свойств интегрального преобразования Меллина. Сам СФМ представляет собой линейный некаузальный фильтр, инвариантный к изменению длительности (масштаба) сигнала. Импульсная характеристика СФМ так же, как и в случае с обычным согласованным фильтром, который в [42, 43] назван согласованным фильтром Фурье (СФФ), рассчитана на получение максимального ОСШ на выходе.

СФМ так же, как и СФФ, представляет собой линейный фильтр со следующими свойствами [43, 44]:

1. Импульсная характеристика СФМ соответствует реакции на входной сигнал $\delta(t - T_M)$

(δ(t) – дельта-функция Дирака) и равна

$$h(t) = \frac{T}{t} s^* \left(\frac{T^2}{t} \right),$$

где *T* – момент времени, соответствующий максимуму выходного сигнала фильтра.

1. Cumming I., Bennett J. Digital processing of Seasat SAR data // Proc. IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Proc. 1979. Vol. 4. P. 710–718. doi: 10.1109/icassp.1979.1170630

2. Jin M. Y., Wu Ch. A SAR correlation algorithm which accommodates large range migration // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1984. № 6. P. 592–597. doi: 10.1109/tgrs.1984.6499176

3. Chang C. Y., Jin M., Curlander J. C. Squint Mode SAR Processing Algorithms // 12th Canadian Symp. on Remote Sensing Geoscience and Remote Sensing Symp. 1989. Vol. 3. P. 1702–1706. doi: 10.1109/igarss.1989.576456 2. Частотная характеристика СФМ, которая соответствует преобразованию Меллина импульсной характеристики h(t), равна

$$H(i\omega) = \int_{0}^{\infty} h(t) \left(\frac{t}{T}\right)^{-i\omega T - 1} dt = F^{*}(i\omega),$$

где $F(i\omega)$ – преобразование Меллина функции $f(t) = \frac{t}{T}s(t).$

3. Выходной сигнал СФМ, равный свертке по Меллину входного сигнала s(t) и импульсной характеристики h(t), равен

$$g(t) = T\int_{0}^{\infty} s(\tau) h\left(\frac{Tt}{\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau} = \frac{T}{t}\int_{0}^{\infty} s(\tau) s^{*}\left(\frac{T\tau}{t}\right) d\tau$$

и достигает своего максимума в момент времени t = T.

4. В момент t = T на выходе фильтра наблюдается максимальное ОСШ:

$$q_{\max}^2 = \frac{E}{N_0},$$

где $E = \int |s(t)|^2 dt$ – энергия сигнала; N_0 – спектральная плотность мощности белого шума на входе фильтра.

5. Форма выходного сигнала СФМ не зависит от масштаба сигнала $s_{\mu}(t) = s(\mu t)$ на входе:

$$g_{\mu}(t) = g_1(\mu t),$$

где $g_1(t)$ – реакция фильтра на сигнал $s_1(t) = s(t); \mu(\mu > 0)$ – масштаб сигнала.

Список литературы

4. Smith A. M. A new approach to range-Doppler SAR processing // Int. J. of Remote Sensing. 1991. Vol. 12, № 2. P. 235–251. doi: 10.1080/01431169108929650

5. Franceschetti G., Schirinzi G. A SAR processor based on two-dimensional FFT code // IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems. 1990. Vol. 26, № 2. P. 356–366. doi: 10.1109/7.53462

6. Cafforio C., Prati C., Rocca F. SAR data focusing using seismic migration techniques // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1991. Vol. 27, № 2. P. 194–207. doi: 10.1109/7.78293

7. Franceschetti G., Lanari R., Marzouk E. S. Aberration free SAR raw data processing via transformed grid

³⁴ Новый алгоритм оценки вектора скорости цели в РСА на основе согласованного фильтра Меллина An Algorithm for Estimating the Velocity of a Moving Target Based on Mellin Matched Filter predeformation // Proc. of IGARSS '93 – IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 1993. Vol. 4. P. 1593– 1595. doi: 10.1109/igarss.1993.322306

8. Stolt R. H. Migration by Fourier transform // Geophysics. 1978. Vol. 43, № 1. P. 23–48. doi: 10.1190/1.1440826

9. Runge H., Bamler R. A Novel High Precision SAR Focussing Algorithm Based on Chirp Scaling // Proc. Article IGARSS '92 Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 1992. Vol. 1. P. 372–375. doi: 10.1109/igarss.1992.576715

10. Cumming I., Wong F., Raney K. A SAR Processing Algorithm with no Interpolation // Proc. IGARSS '92 Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 1992. Vol. 1. P. 376–379. doi: 10.1109/igarss.1992.576716

11. Wong F., Cumming I., Raney R. K. Processing simulated RADARSAT SAR data with squint by a high precision algorithm // Proc. of IGARSS '93. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 1993. Vol. 3. P. 1176–1178. doi: 10.1109/igarss.1993.322127

12. Precision SAR processing using chirp scaling / R. K. Raney, H. Runge, R. Bamler, I. G. Cumming, F. H. Wong // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1994. Vol. 32, № 4. P. 786–799. doi: 10.1109/36.298008

13. Moreira A., Huang Y. Airbome SAR Processing of Highly Squinted Data Using a Chirp Scaling Approach with Integrated Motion Compensation // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1994. Vol. 32, № 5. P. 1029–1040. doi: 10.1109/36.312891

14. Moreira A., Mittermayer J., Scheiber R. Extended chirp scaling algorithm for air- and spaceborne SAR data processing in stripmap and scanSAR imaging modes // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1996. Vol. 34, № 5. P. 1123–1136. doi: 10.1109/36.536528

15. Mittermayer J., Moreira A., Loffeld O. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1999. Vol. 37, № 5. P. 2198–2214. doi: 10.1109/36.789617

16. Zhu D., Shen M., Zhu Z. Some Aspects of Improving the Frequency Scaling Algorithm for Dechirped SAR Data Processing // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2008. Vol. 46, № 6. P. 1579–1588. doi: 10.1109/tgrs.2008.916468

17. Perry R. P., DiPietro R. C., Fante R. L. SAR imaging of moving targets // IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems. 1999. Vol. 35, № 1. P. 188–200. doi: 10.1109/7.745691

18. Perry R. P., DiPietro R. C., Fante R. L. Coherent Integration with Range Migration Using Keystone Formatting // IEEE Radar Conf. 2007. Waltham, USA, 17–20 Apr. 2007. IEEE, 2007. P. 863–868. doi: 10.1109/radar.2007.374333

19. Zhu D., Li Y., Zhu Z. A Keystone Transform without Interpolation for SAR Ground Moving Target Imaging // IEEE Geoscience and Remote Sensing Lett. 2007. Vol. 4, № 1. P. 18–22. doi: 10.1109/lgrs.2006.882147

20. Monakov A. A. A Simple Algorithm for Compensation of the Range Cell Migration in a Stripmap SAR // J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021. Vol. 24, № 2. P. 27–37. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-2-27-37

21. Approach for single channel SAR ground moving target imaging and motion parameter estimation / F. Zhou, R. Wu, M. Xing, Z. Bao // IET Radar, Sonar & Navigation. 2007. Vol. 1, № 1. P. 59–66. doi: 10.1049/iet-rsn:20060040

22. Kirkland D. Imaging moving targets using the second-order keystone transform // IET Radar, Sonar & Navigation. 2011. Vol. 5, № 8. P. 902–910. doi: 10.1049/iet-rsn.2010.0304

23. Kirkland D. An alternative range migration correction algorithm for focusing moving targets // Progress in Electromagnetics Research. 2012. Vol. 131. P. 227–241. doi: 10.2528/PIER12060711

24. Djurovi'c I., Thayaparan T., Stankovi'c L. SAR Imaging of Moving Targets using Polynomial FT // IET Signal Processing. 2008. Vol. 2, № 3. P. 1436–1447. doi: 10.1049/iet-spr:20070114

25. Монаков А. А. Оценка параметров сигнала с полиномиальным законом фазовой модуляции // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 5. С. 24–36. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-5-24-36

26. Li G., Xia X.-G., Peng Y.-N. Doppler keystone transform for SAR imaging of moving targets // Proc. of the 2008 Congress on Image and Signal Processing. 2008. Vol. 4. P. 716–719. doi: 10.1109/CISP.2008.600

27. Cohen L. Time-frequency distributions – a review // Proc. of the IEEE. 1989. Vol. 77, N_{2} 7. P. 941–981. doi: 10.1109/5.30749

28. Hlawatsch F., Boudreaux-Bartels G. F. Linear and quadratic time-frequency signal representations // IEEE Signal Processing Magazine. 1992. Vol. 9, № 2. P. 21–67. doi: 10.1109/79.127284

29. Claasen T. A. C. M., Mecklenbräuker W. F. G. The Wigner distribution – a tool for time-frequency signal analysis. Pt. I: continuous-time signals // Philips J. Res. 1980. Vol. 35, N_{2} 3. P. 217–250.

30. Boashash B. Note on the use of the Wigner distribution for time-frequency signal analysis // IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing. 1988. Vol. 36, N_{Ω} 9. P. 1518–1521. doi: 10.1109/29.90380

31. Barbarossa S., Farina A. Detection and imaging of moving objects with synthetic aperture radar. Pt. 2: Joint time-frequency analysis by Wigner-Ville distribution // IEE Proc. F Radar Signal Process. 1992. Vol. 139, № 1. P. 89–97. doi: 10.1049/ip-f-2.1992.0011

32. Wood J. C., Barry D. T. Radon transformation of time-frequency distributions for analysis of multicomponent signals // IEEE Transactions on Signal Processing. 1994. Vol. 42, № 11. P. 3166–3177. doi: 10.1109/78.330375

33. Barbarossa S. Analysis of multicomponent LFM signals by a combined Wigner-Hough transform // IEEE

Новый алгоритм оценки вектора скорости цели в PCA на основе согласованного фильтра Меллина35An Algorithm for Estimating the Velocity of a Moving Target Based on Mellin Matched Filter35

Transactions on Signal Processing. 1995. Vol. 43, № 6. P. 1511–1515. doi: 0.1109/78.388866

34. Sejdić E., Djurović I., Jiang J. Time-frequency feature representation using energy concentration: An overview of recent advances // Digital Signal Processing. 2009. Vol. 19, № 1. P. 153–183. doi: 10.1016/j.dsp.2007.12.004

35. Almeida L. B. The fractional Fourier transform and time-frequency representations // IEEE Transactions on Signal Processing. 1994. Vol. 42, № 11. P. 3084–3091. doi: 10.1109/78.330368

36. Sejdic' E., Djurovic' I., Stankovic' L. Fractional Fourier transform as a signal processing tool: An overview of recent developments // Signal Processing. 2011. Vol. 91, № 6. P. 1351–1369. doi: 10.1016/j.sigpro.2010.10.008

37. Keystone transformation of the Wigner-Ville distribution for analysis of multicomponent LFM signals / X. L. Lv, M. D. Xing, S. H. Zhang, Z. Bao // Signal Processing. 2009. Vol. 59. P. 791–806. doi: 10.1016/j.sigpro.2008.10.029

38. ISAR imaging of maneuvering targets based on the range centroid Doppler technique / X. L. Lv, M. D. Xing, C. R. Wan, S. H. Zhang // IEEE Trans. on Image Process. 2010. Vol. 19, № 1. P. 141–153. doi: 10.1109/TIP.2009.2032892

39. Lv's distribution: principle, implementation, properties, and performance / X. L. Lv, G. A. Bi, C. R. Wan, M. D. Xing // IEEE Trans. on Signal Pro-

cess. 2011. Vol. 59, № 8. P. 3576–3591. doi: 10.1109/TSP.2011.2155651

40. Luo S., Lv X., Bi G. Lv's distribution for time-frequency analysis // Proc. of 2011 Int. Conf. on Circuits, Systems, Control, Signals. 2011. P. 110–115.

41. Performance analysis on Lv distribution and its applications / Sh. Luo, G. Bi, X. Lv, F. Hu // Digital Signal Process. 2013. Vol. 23, № 3. P. 797–807. doi: 10.1016/j.dsp.2012.11.011

42. Монаков А. А. Применение масштабноинвариантных преобразований при решении некоторых задач цифровой обработки сигналов // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. Т. 65, № 11. С. 65–72.

43. Монаков А. А. Согласованный фильтр Меллина // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. Т. 67, № 2. С. 56–62.

44. Monakov A. The Mellin matched filter // IEEE J. of Selected Topics in Signal Processing. 2015. Vol. 9, № 8. P. 1451–1459. doi: 10.1109/JSTSP.2015.2465309

45. De Sena A., Rocchesso D. A fast Mellin transform with applications in DAF // Proceedings of the 7^{th} Int. Conf. on Digital Audio Effects (DAFx '04). 2004. P. 65–69.

46. De Sena A., Rocchesso D. A fast Mellin and scale transform // EURASIP J. on Advances in Signal Processing. 2007. P. 1–9. doi: 10.1155/2007/89170

Информация об авторе

Монаков Андрей Алексеевич – доктор технических наук (2000), профессор (2005) кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Почетный машиностроитель РФ (2005), почетный работник высшего профессионального образования РФ (2006). Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокация протяженных целей; цифровая обработка сигналов; радиолокаторы с синтезированной апертурой; исследование природных сред радиотехническими методами; управление воздушным движением.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Большая Морская, д. 67 А, Санкт-Петербург, 190000, Россия

E-mail: a_monakov@mail.ru

https://orcid.org/0000-0003-4469-0501

References

1. Cumming I., Bennett J. Digital processing of Seasat SAR data. Proc. IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Proc. 1979, vol. 4, pp. 710–718. doi: 10.1109/icassp.1979.1170630

2. Jin M. Y., Wu Ch. A SAR Correlation Algorithm Which Accommodates Large Range Migration. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1984, no. 6, pp. 592–597. doi: 10.1109/tgrs.1984.6499176

3. Chang C. Y., Jin M., Curlander J. C. Squint Mode SAR Processing Algorithms. 12th Canadian Symp. on Remote Sensing Geoscience and Remote Sensing Symp. 1989, vol. 3, pp. 1702–1706. doi: 10.1109/igarss.1989.576456

4. Smith A. M. A New Approach to Range-Doppler SAR Processing. Int. J. of Remote Sensing. 1991, vol. 12, no. 2, pp. 235–251. doi: 10.1080/01431169108929650

.....

5. Franceschetti G., Schirinzi G. A SAR Processor Based on Two-Dimensional FFT code. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems. 1990, vol. 26, no. 2, pp. 356–366. doi: 10.1109/7.53462

6. Cafforio C., Prati C., Rocca F. SAR Data Focusing Using Seismic Migration Techniques. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1991, vol. 27, no. 2, pp. 194–207. doi: 10.1109/7.78293

7. Franceschetti G., Lanari R., Marzouk E. S. Aberration Free SAR Raw Data Processing Via Transformed Grid Predeformation. Proc. of IGARSS '93 – IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 1993, vol. 4, pp. 1593– 1595. doi: 10.1109/igarss.1993.322306

8. Stolt R. H. Migration by Fourier Transform. Geophysics. 1978, vol. 43, no. 1, pp. 23–48. doi: 10.1190/1.1440826

³⁶ Новый алгоритм оценки вектора скорости цели в РСА на основе согласованного фильтра Меллина An Algorithm for Estimating the Velocity of a Moving Target Based on Mellin Matched Filter
9. Runge H., Bamler R. A Novel High Precision SAR Focussing Algorithm Based on Chirp Scaling. Proc. Article IGARSS '92 Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 1992, vol. 1, pp. 372–375. doi: 10.1109/igarss.1992.576715

10. Cumming I., Wong F., Raney K. A SAR Processing Algorithm with no Interpolation. Proc. IGARSS '92 Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 1992, vol. 1, pp. 376–379. doi: 10.1109/igarss.1992.576716

11. Wong F., Cumming I., Raney R. K. Processing Simulated RADARSAT SAR Data with Squint by a High Precision Algorithm. Proc. of IGARSS '93. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 1993, vol. 3, pp. 1176–1178. doi: 10.1109/igarss.1993.322127

12. Raney R. K., Runge H., Bamler R., Cumming I. G., Wong F. H. Precision SAR Processing Using Chirp Scaling. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1994, vol. 32, no. 4, pp. 786–799. doi: 10.1109/36.298008

13. Moreira A., Huang Y. Airbome SAR Processing of Highly Squinted Data Using a Chirp Scaling Approach with Integrated Motion Compensation. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1994, vol. 32, no. 5, pp. 1029–1040. doi: 10.1109/36.312891

14. Moreira A., Mittermayer J., Scheiber R. Extended Chirp Scaling Algorithm for Air- and Spaceborne SAR Data Processing in Stripmap and ScanSAR Imaging Modes. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1996, vol. 34, no. 5, pp. 1123–1136. doi: 10.1109/36.536528

15. Mittermayer J., Moreira A., Loffeld O. Spotlight SAR Data Processing Using the Frequency Scaling Algorithm. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1999, vol. 37, no. 5, pp. 2198–2214. doi: 10.1109/36.789617

16. Zhu D., Shen M., Zhu Z. Some Aspects of Improving the Frequency Scaling Algorithm for Dechirped SAR Data Processing. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2008, vol. 46, no. 6, pp. 1579–1588. doi: 10.1109/tgrs.2008.916468

17. Perry R. P., DiPietro R. C., Fante R. L. SAR imaging of moving targets. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems. 1999, vol. 35, no. 1, pp. 188–200. doi: 10.1109/7.745691

18. Perry R. P., DiPietro R. C., Fante R. L. Coherent Integration with Range Migration Using Keystone Formatting. IEEE Radar Conf. Waltham, USA, 17–20 April 2007. IEEE, 2007, pp. 863–868. doi: 10.1109/radar.2007.374333

19. Zhu D., Li Y., Zhu Z. A Keystone Transform without Interpolation for SAR Ground Moving Target Imaging. IEEE Geoscience and Remote Sensing Lett. 2007, vol. 4, no. 1, pp. 18–22. doi: 10.1109/lgrs.2006.882147

20. Monakov A. A. A Simple Algorithm for Compensation of the Range Cell Migration in a Stripmap SAR. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 2, pp. 27–37. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-2-27-37

21. Zhou F., Wu R., Xing M., Bao Z. Approach for

Single Channel SAR Ground Moving Target Imaging and Motion Parameter Estimation. IET Radar, Sonar & Navigation. 2007, vol. 1, no. 1, pp. 59–66. doi: 10.1049/iet-rsn:20060040

22. Kirkland D. Imaging Moving Targets Using the Second-Order Keystone Transform. IET Radar, Sonar & Navigation. 2011, vol. 5, no. 8, pp. 902–910. doi: 10.1049/iet-rsn.2010.0304

23. Kirkland D. An Alternative Range Migration Correction Algorithm for Focusing Moving Targets. Progress in Electromagnetics Research. 2012, vol. 131, pp. 227–241. doi: 10.2528/PIER12060711

24. Djurovi'c I., Thayaparan T., Stankovi'c L. SAR Imaging of Moving Targets using Polynomial FT. IET Signal Processing. 2008, vol. 2, no. 3, pp. 1436–1447. doi: 10.1049/iet-spr:20070114

25. Monakov A. A. Parameter Estimation of Polynomial-Phase Signals. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 5, pp. 24–36. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-5-24-36 (In Russ.)

26. Li G., Xia X.-G., Peng Y.-N. Doppler Keystone Transform for SAR Imaging of Moving Targets. Proc. of the 2008 Congress on Image and Signal Processing. 2008, vol. 4, pp. 716–719. doi: 10.1109/CISP.2008.600

27. Cohen L. Time-Frequency Distributions – a Review. Proc. of the IEEE. 1989, vol. 77, no. 7, pp. 941–981. doi: 10.1109/5.30749

28. Hlawatsch F., Boudreaux-Bartels G. F. Linear and Quadratic Time-Frequency Signal Representations. IEEE Signal Processing Magazine. 1992, vol. 9, no. 2, pp. 21–67. doi: 10.1109/79.127284

29. Claasen T. A. C. M., Mecklenbräuker W. F. G. The Wigner Distribution – a Tool For Time-Frequency Signal Analysis. Part I: Continuous-Time Signals. Philips J. Res. 1980, vol. 35, no. 3, pp. 217–250.

30. Boashash B. Note on the Use of the Wigner Distribution for Time-Frequency Signal Analysis. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1988, vol. 36, no. 9, pp. 1518–1521. doi: 10.1109/29.90380

31. Barbarossa S., Farina A. Detection and Imaging of Moving Objects with Synthetic Aperture Radar. Part 2: Joint Time-Frequency Analysis by Wigner-Ville distribution. IEE Proc. F Radar Signal Process. 1992, vol. 139, no. 1, pp. 89–97. doi: 10.1049/ip-f-2.1992.0011

32. Wood J. C., Barry D. T. Radon Transformation of Time-Frequency Distributions for Analysis of Multicomponent Signals. IEEE Transactions on Signal Processing. 1994, vol. 42, no. 11, pp. 3166–3177. doi: 10.1109/78.330375

33. Barbarossa S. Analysis of Multicomponent LFM signals by a Combined Wigner-Hough Transform // IEEE Transactions on Signal Processing. 1995, vol. 43, no. 6, pp. 1511–1515. doi: 0.1109/78.388866

34. Sejdić E., Djurović I., Jiang J. Time-Frequency Feature Representation Using Energy Concentration: An Overview of Recent Advances. Digital Signal Processing. 2009, vol. 19, no. 1, pp. 153–183. doi:

Новый алгоритм оценки вектора скорости цели в РСА на основе согласованного фильтра Меллина37An Algorithm for Estimating the Velocity of a Moving Target Based on Mellin Matched Filter37

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 3. С. 22–38 Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 22–38

10.1016/j.dsp.2007.12.004

35. Almeida L. B. The Fractional Fourier Transform and Time-Frequency Representations. IEEE Transactions on Signal Processing. 1994, vol. 42, no. 11, pp. 3084–3091. doi: 10.1109/78.330368

36. Sejdic' E., Djurovic' I., Stankovic' L. Fractional Fourier Transform as a Signal Processing Tool: An Overview of Recent Developments. Signal Processing, 2011, vol. 91, no. 6, pp. 1351–1369. doi: 10.1016/j.sigpro.2010.10.008

37. Lv X. L., Xing M. D., Zhang S. H., Bao Z. Keystone Transformation of the Wigner-Ville Distribution for Analysis of Multicomponent LFM signals. Signal Processing. 2009, vol. 59, pp. 791–806. doi: 10.1016/j.sigpro.2008.10.029

38. Lv X. L., Xing M. D., Wan C. R., Zhang S. H. ISAR Imaging of Maneuvering Targets Based on the Range Centroid Doppler Technique. IEEE Trans. on Image Process. 2010, vol. 19, no. 1, pp. 141–153. doi: 10.1109/TIP.2009.2032892

39. Lv X. L., Bi G. A., Wan C. R., Xing M. D. Lv's Distribution: Principle, Implementation, Properties, and Performance. IEEE Trans. on Signal Process. 2011, vol. 59, no. 8, pp. 3576–3591. doi: 10.1109/TSP.2011.2155651

40. Luo S., Lv X., Bi G. Lv's Distribution for Time-Frequency Analysis. Proc. of 2011 Int. Conf. on Circuits, Systems, Control, Signals. 2011, pp. 110–115.

41. Luo Sh., Bi G., Lv X., Hu F. Performance Analysis on Lv Distribution and its Aapplications. Digital Signal Process. 2013, vol. 23, no. 3, pp. 797– 807. doi: 10.1016/j.dsp.2012.11.011

42. Monakov A. A. Application of Scale Invariant Transforms to Some Problems in Digital Signal Processing. J. Achievements of Modern Radioelectronics, 2011, vol. 65, no. 11, pp. 65–72. (In Russ.)

43. Monakov A. A. The Mellin Matched Filter. J. Achievements of Modern Radioelectronics. 2013, vol. 67, no. 2, pp. 56–62. (In Russ.)

44. Monakov A. The Mellin Matched Filter. IEEE J. of Selected Topics in Signal Processing. 2015, vol. 9, no. 8, pp. 1451–1459. doi: 10.1109/JSTSP.2015.2465309

45. De Sena A., Rocchesso D. A Fast Mellin Transform with Applications in DAF. Proc. of the 7^{th} Int. Conf. on Digital Audio Effects (DAFx '04). 2004, pp. 65–69.

46. De Sena A., Rocchesso D. A fast Mellin and Scale Transform. EURASIP J. on Advances in Signal Processing. 2007, pp. 1–9. doi: 10.1155/2007/89170

Information about the author

Andrey A. Monakov – Dr Sci. (Eng.) (2000), Professor (2005) of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. Honored Mechanical Engineer of the Russian Federation (2005), Honored Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation (2006). The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: extended radar targets; digital signal processing; synthetic aperture radar; remote sensing; air traffic control.

Address: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67 A, Bolshaya Morskaya St., St Petersburg 190000, Russia

E-mail: a_monakov@mail.ru https://orcid.org/0000-0003-4469-0501 Радиолокация и радионавигация УДК 621.396.96 https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-3-39-50

Оригинальная статья

Экспериментальное исследование траекторных признаков для распознавания низколетящих малоскоростных радиолокационных целей в полуактивной РЛС

Дао Ван Лук^{1⊠}, А. А. Коновалов², Ле Минь Хоанг¹

¹ Государственный технический институт им. Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам

² НИИ "Прогноз", Санкт-Петербург, Россия

[™] daolucvtl01@gmail.com

Аннотация

Введение. Малые беспилотные воздушные суда (БВС) представляют собой растущую угрозу из-за их возможного неправомерного использования для незаконной деятельности. В настоящее время полуактивные РЛС широко используются для обнаружения, сопровождения и распознавания движущихся целей, в том числе малых БВС, что делает их перспективным средством использования в современных системах радиолокационного мониторинга воздушного пространства. При этом распознавание малых БВС является сложной задачей, так как ввиду сходства характеристик их легко спутать с птицами, особенно в морских районах, где популяции птиц могут быть значительными. Для решения проблемы распознавания малых БВС предлагается использовать траекторные признаки.

Цель работы. Анализ траекторных признаков низколетящих малоскоростных целей и исследование возможности применения для решения задач распознавания этих целей.

Материалы и методы. Использованы реальные радиолокационные отметки БВС и птиц, полученные в полуактивной РЛС. Построены характеристики траекторных параметров целей типа "БВС" и "птица" с помощью компьютерного статистического моделирования в среде MatLab; применен метод сравнительного анализа для определения различия траектории целей.

Результаты. Экспериментальные исследования показали существенные различия траекторий полета БВС и птиц. Исследованы особенности траекторий малых воздушных целей каждого типа. Построены графики характерных параметров траектории полета БВС и птиц на основе их радиолокационных отметок. В результате сравнительного анализа данных определены характеристики полета каждого типа целей на каждом участке движения, выделены информативные траекторные признаки, которые можно использовать для разработки алгоритма распознавания в пассивном когерентном локаторе (ПКЛ).

Заключение. Результаты эксперимента подтвердили практическую значимость предлагаемых траекторных признаков и возможность их применения при разработке алгоритма распознавания низколетящих малоскоростных радиолокационных целей в ПКЛ. Использование различий траекторий полета БВС и птиц способно повысить качество решения задачи распознавания БВС.

Ключевые слова: распознавание радиолокационных целей, траекторный признак, пассивный когерентный радиолокатор, малое БВС

Для цитирования: Дао Ван Лук, Коновалов А. А., Ле Минь Хоанг. Экспериментальное исследование траекторных признаков для распознавания низколетящих малоскоростных радиолокационных целей в полуактивной РЛС // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 3. С. 39–50. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-39-50

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 15.03.2022; принята к публикации после рецензирования 16.05.2022; опубликована онлайн 28.06.2022



Radar and Navigation

Original article

Experimental Study of Trajectory Features for the Recognition of Low-Flying Low-Speed Radar Targets Using Passive Coherent Radar Systems

Dao Van Luc ¹, Aleksandr A. Konovalov ², Le Minh Hoang ¹

¹Le Quy Don Technical University, Ha Noi, Viet Nam

² Research Institute "Prognoz", St Petersburg, Russia

[⊠] daolucvtl01@gmail.com

Abstract

Introduction. Small unmanned aerial vehicles (UAVs) are a growing threat due to their possible use for illegal activities. Currently, passive coherent radar systems are widely used to detect, track and recognize moving targets, including small UAVs, which makes them a promising tool for use in modern airspace radar monitoring systems. At the same time, recognition of small UAVs becomes a challenging task due the possibility of confusing them with birds, particularly in maritime areas with large bird populations. In a search for new solutions to the problem of recognizing small UAVs, trajectory features can be used.

Aim. To analyze differences between the trajectory features of low-flying low-speed targets in order to verify the possibility of their use for recognition purposes.

Materials and methods. Real radar measurements of UAVs and birds obtained by a passive coherent radar system were used. Specific characteristics of the trajectory parameters of target classes were built using computer statistical modeling in the MatLab environment. Differences in the movement trajectory of targets were established by comparative analysis.

Results. Significant differences between the flight path of UAVs and birds were found. Specific features of the trajectory of small aerial targets of each type were investigated. On the basis of radar measurement, graphs of the characteristic trajectory parameters of UAVs and birds were plotted. The conducted comparative analysis allowed identification of the characteristics of the flight path of each target type in each movement segment. Trajectory features that can be used for recognition purposes were identified.

Conclusion. The practical significance of the proposed trajectory features and the possibility of their implementation in the development of an algorithm for recognizing low-flying low-speed radar targets using passive coherent radar systems was established. The knowledge of differences between the flight path of UAVs and birds can improve the quality of the UAV recognition problem.

Keywords: radar targets recognition, trajectory feature, passive coherent radar, small UAV

For citation: Dao Van Luc, Konovalov A. A., Le Minh Hoang. Experimental Study of Trajectory Features for the Recognition of Low-Flying Low-Speed Radar Targets Using Passive Coherent Radar Systems. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 39–50. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-39-50

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

Submitted 15.03.2022; accepted 16.05.2022; published online 28.06.2022

Введение. В последние десятилетия одной из основных задач, определяющих развитие радиолокационных систем (РЛС), является обеспечение обнаружения воздушных объектов на малых и предельно малых высотах. В связи с широким распространением беспилотных воздушных судов (БВС) возрастает вероятность использования их для совершения незаконных действий. Активное развитие БВС, находящихся в том числе в частном пользовании, ставит перед системой контроля воздушного пространства задачу по устранению новой угрозы 40

для безопасности воздушного движения над административно-политическими центрами и техническими объектами. Также осуществление контроля за порядком использования воздушного пространства постоянно усложняется в связи с бурным развитием БВС различного класса и назначения. Эта проблема характерна для всех государств, особенно для воздушного пространства в районе крупных административных центров. Малые БВС могут решать разведывательные задачи (на сегодня это основное их предназначение), применяться для

нанесения ударов по наземным и морским целям, перехвата воздушных целей, осуществлять постановку радиопомех, управление огнем и целеуказание, ретрансляцию сообщений и данных, доставку грузов. С целью контроля пространства и противодействия опасностям, исходящим от БВС, в настоящее время создаются различные радиотехнические средства, задачами которых в плане борьбы с БВС являются обнаружение целей, оценка параметров их движения, распознавание цели как БВС и выдача информации о ней сопряженным устройствам, в том числе устройству подавления БВС [1–4].

Таким образом, задача распознавания низколетящих малоскоростных радиолокационных целей вызывает повышенный интерес, особенно у разработчиков РЛС контроля пространства и противодействия БВС, поскольку реализация режимов распознавания обеспечивает повышение адекватности радиолокационной информации, получаемой от РЛС на пунктах управления различной степени иерархии, что позволит оптимизировать принимаемые решения в условиях реально складывающейся обстановки.

В настоящее время основное внимание при распознавании БВС и других типов целей сосредоточено на анализе сигнальных признаков (дальностного портрета, микродоплеровской сигнатуры). Однако эти методы не всегда применимы: для построения дальностного портрета необходимо иметь высокое разрешение по дальности, микродоплеровская сигнатура при обычно используемых пластмассовых винтах различима в основном на малых дальностях [5].

В связи с этим возрастает актуальность извлечения данных, пригодных для распознавания, из анализа других атрибутов цели. Одним из перспективных направлений повышения качества распознавания БВС представляется использование траекторных признаков, под которыми понимаются параметры целей, оцениваемые по результатам анализа их траекторий (т. е. результатов вторичной, или траекторной, обработки радиолокационной информации) [6, 7].

Целью работы, описываемой в настоящей статье, является экспериментальное исследование траекторных признаков низколетящих целей (БВС и птицы) для решения задач их распознавания.

Постановка задачи. По многим признакам класс БВС пересекается с классом птиц, поэтому возникает задача распознавания БВС и птиц. Сосредоточимся при распознавании на анализе траекторных признаков. Траекторные признаки – это параметры траекторий целей, характеризующие ее тактико-технические характеристики. Для движущихся целей такими параметрами являются скорость, ускорение, высота, направление (курс) и др. В настоящее время не так много статей о характеристиках траектории полета птиц и БВС.

Для решения задач фильтрации параметров и построения модели анализа траекторий движения воздушных объектов прежде всего необходимо изучить летные характеристики цели.

Рассмотрим уравнение движения воздушной цели:

$$\mathbf{x}_{k+1} = F_k \mathbf{x}_k + G_k \mathbf{u}_k + \Gamma_k \mathbf{w}_k,$$

где **х** – вектор состояния; F – переходная матрица (матрица экстраполяции), отражающая взаимосвязь предыдущего и последующего значений **х**; G – матрица интенсивности управления (входная матрица); **u** – вектор детерминированных управляющих воздействий; Γ – матрица, отражающая влияние шума процесса на вектор состояния; **w** – вектор случайных воздействий (шум процесса); k – шаг оценивания.

Поскольку птицы способны совершать маневры различной интенсивности с заранее неизвестными характеристиками, необходимо экспериментальное исследование характера их полета.

Краткий обзор характеристик полета птиц и БВС. Для исследования летных характеристик птиц и БВС можно использовать следующие методы:

 визуальное наблюдение за летными характеристиками птиц и БВС (поскольку эти типы целей медленные и низколетящие);

 – анализ реальных экспериментальных данных (например, радиолокационных);

 имитационное моделирование. Для построения модели необходимо исследовать летные характеристики двумя перечисленными методами. В настоящее время практически невозможно построить имитационную модель полета птиц.

Краткое изучение летных характеристик

Экспериментальное исследование траекторных признаков для распознавания	41
низколетящих малоскоростных радиолокационных целей в полуактивной РЛС	
Experimental Study of Trajectory Features for the Recognition	
of Low-Flying Low-Speed Radar Targets Using Passive Coherent Radar Systems	

цели достигается посредством анализа литературы о птицах и инструкции БВС, а также визуальным наблюдением. Рассмотрим кратко их летные характеристики.

К объектам класса "птицы" могут относиться одиночные птицы либо стаи. Большинство птиц летает на высоте 100 м от земли, чем выше, тем быстрее уменьшается их количество в пространстве. Только в период миграции крупные и средние птицы летают на высотах от 300 до 2000 м. При отсутствии попутного ветра скорость перемещения птиц не превышает 20 м/с. При наличии попутного ветра скорость перемещения представляет собой сумму векторов собственной скорости перемещения птиц и скорости ветра. В табл. 1 представлены летные характеристики некоторых птиц Ленинградской области [8–11].

Малые БВС разделяются на летательные аппараты (ЛА) вертолетного и самолетного типов, а также мультикоптеры. В данной статье рассмотрены характеристики БВС типа мультикоптер. Их особенности: крейсерская скорость полета типовых ЛА – не более 20 м/с;

Табл. 1. Летные характеристики птиц *Tab. 1.* Flight parameters of various birds

	Характеристики полета птиц			
Тип птиц	Скорость	Высота	Миграционная	
	полета, м/с	полета, м	активность	
Чайка	1117	100	Дневная, ночная	
Вороны	1114	100	Дневная	
Утки	1821	100	Ночная	
Голубь	1117	100	Дневная, ночная	
Гусь	1417	2000	Дневная, ночная	
Лебедь	1518	2000	Дневная, ночная	
Журавль	1117	1000	Дневная, ночная	

высота полета для типовых ЛА – в интервале от единиц метров до 500 м. В табл. 2 приведены параметры полета малоразмерных популярных БВС [12, 13].

Анализ траекторных характеристик птиц и БВС позволяет построить метод распознавания БВС, задачей которого является оценка вероятности принадлежности рассматриваемой цели к классу "БВС". Задача различения БВС и птиц осложняется тем, что объекты этих двух классов двигаются примерно с одинаковыми скоростями, на одинаковых высотах и зачастую обладают схожими эффективными площадями рассеяния, вследствие чего разделение их алгоритмом классификации по совокупности сигнальных радиолокационных признаков не происходит [14, 15].

Основным отличием движения птицы как живого существа от механического БВС является то, что движение БВС – жесткое, т. е. все части объекта изменяют свое положение в пространстве одновременно, тогда как движение птицы – нежесткое, т. е. некоторые части объекта совершают движение, отличное от других, например, движение тела и крыльев. Выделяют следующие виды полета птиц: машущий (за счет движения крыльев вверх и вниз); трепещущий (машущий с зависанием и при взлете/посадке); планирующий (движение за счет потоков воздуха с редкими взмахами крыльев) и парящий (крылья неподвижны). При этом разным птицам присущи разные виды полета и разное их сочетание. Наименее жестким является машущий полет, наиболее жестким - парящий. Известно, что в настоящее время ведутся работы по созданию БВС, чье перемещение в воздухе будет неотличимо от птиц, однако далее будем полагать, что и БВС, и птицы совершают полет обычным для себя образом.

Второй аспект, в котором движение БВС и

Табл.	2.	Траекторные параметры	БВС по	TΧ
Tał	b. 2	? Flight parameters of vario	us UAV	s

	Характеристики полета БВС				
БВС	Максимальная скорость, м/с	Высота полета, м	Радиус управления, м	Максимальное время полета, мин	Спутниковые системы позиционирования
DJI Phantom 3	16	120	< 1000	25	GPS
Syma X30	10	100	< 300	23	GPS
Hubsan H117S Zino	18	120	< 2000	23	GPS / GLONASS

Экспериментальное исследование траекторных признаков для распознавания низколетящих малоскоростных радиолокационных целей в полуактивной РЛС Experimental Study of Trajectory Features for the Recognition of Low-Flying Low-Speed Radar Targets Using Passive Coherent Radar Systems птицы может отличаться, — это реакция на ветер. БВС вносит поправку в управляющее воздействие на двигатели достаточно плавно, тогда как птица будет компенсировать снос более энергичными взмахами крыльев.

Кроме того, если БВС, совершая целенаправленный полет по заранее заданной программе, движется примерно с постоянной скоростью, то птица может чередовать разные виды полета (например, машущий и парящий).

Таким образом, можно заключить, что если БВС и птица совершают полет по прямой в одинаковых условиях, то за счет нежесткого характера движения для траектории птицы будет характерен больший размах отклонений движения от прямолинейного – высота, скорость, курс и скорость поворота у нее могут меняться в большем диапазоне.

Экспериментальные исследования траекторных характеристик птиц и БВС. Для получения экспериментальных данных использовался опытный образец полуактивного локатора (рис. 1, а), разработанный в Санкт-Петербургском электротехническом университете "ЛЭТИ". Экспериментальный локатор работает на частоте 666 МГц с эффективной полосой 7.61 МГц при использовании сторонних сигналов цифрового эфирного телевидения DVB-T2. Данный локатор способен обнаруживать малые БВС на расстоянии до 10 км и птиц – 20 км. Радар обеспечивает точность измерения по дальности 50 м, по азимуту 10; период обзора – 3 с. В ходе эксперимента наблюдались отметки от птиц, тестового БВС DJI Phantom 3 (рис. 1, б), анализировались микродоплеровские сигнатуры сигналов, отраженных от этих целей [15, 16].

Скорость, ускорение, курс, скорость поворота являются основными траекторными параметрами для анализа. Они непосредственно вычисляются на основе измерения координат [17].

На основании данных вектора координат цели [x, y] можно вычислить текущие (для *k*-го шага оценивания):

– вектор скорости цели
$$[v_x, v_y]$$
:

$$v_{x(k)} = \frac{x_k - x_{k-1}}{\Delta t_k}; v_{y(k)} = \frac{y_k - y_{k-1}}{\Delta t_k},$$





Рис. 1. Экспериментальная аппаратура: a – опытный образец полуактивного локатора; δ – БВС – квадрокоптер DJI Phantom 3 Fig. 1. Experiment apparatus: a – experimental passive coherent radar; δ – UAV – DJI Phantom 3 quadcopter

где Δt_k — время между двумя отметками на k-м и (k-1)-м шагах оценивания;

- модуль скорости:

$$v_k = \sqrt{{v_x}^2 + {v_y}^2};$$

- курс цели:

$$\varphi_k = \operatorname{arctg}(v_x/v_y);$$

– вектор ускорения цели $[a_x, a_y]$:

$$a_{x(k)} = \frac{v_{x(k)} - v_{x(k-1)}}{\Delta t_{k}}; \ a_{y(k)} = \frac{v_{y(k)} - v_{y(k-1)}}{\Delta t_{k}};$$

– модуль ускорения:

$$a_k = \sqrt{a_{x(k)}^2 + a_{y(k)}^2};$$

угловую скорость цели при совершении
ею скоординированного поворота:

$$\omega_k = \frac{\varphi_k - \varphi_{k-1}}{\Delta t_k}.$$

43

Экспериментальное исследование траекторных признаков для распознавания низколетящих малоскоростных радиолокационных целей в полуактивной РЛС Experimental Study of Trajectory Features for the Recognition of Low-Flying Low-Speed Radar Targets Using Passive Coherent Radar Systems

К параметрам, характеризующим траекторию в целом или отдельный ее участок, относятся:

– длительность траектории *T*, выраженная в секундах;

- количество измерений N за время существования траектории;

минимальная и максимальная скорости цели v_{min} и v_{max};

— минимальное и максимальное ускорения цели a_{\min} и a_{\max} ;

– минимальный и максимальный курсы цели ϕ_{min} и ϕ_{max} ;

 – минимальная и максимальная скорости поворота цели ω_{min} и ω_{max}.

Большой интерес для распознавания представляют статистические характеристики указанных параметров, такие, как математическое ожидание (выборочное среднее) и выборочное среднеквадратическое отклонение (СКО).

Траекторные характеристики птиц. В целом траектория полета птицы имеет более случайный характер, чем БВС, как по амплитуде, так и по направлению полета. В ходе исследований был проведен анализ более 120 траекторий полета птиц. На рис. 2 приведен пример траектории птицы с 240 отметками.

На траектории полета птиц можно наблюдать участки кружения. Это связано с их поведенческими и биологическими особенностями. Такие участки траекторий можно считать одним из признаков птицы: птица, в отличие от БВС, зависнуть на одном месте не может, тогда как БВС, наоборот, кружиться, как правило, незачем – оно при необходимости просто зависает на одном месте.





Что касается линейной части траектории, то птица в целом выдерживает направление движения, однако на большей части траектории наблюдаются довольно значительные отклонения. Это могут быть как плавные волнообразные отклонения, так и более резкие, доходящие до 100 м.

Теперь рассмотрим, как указанные явления, характерные для полета птиц, отражаются на параметрах их траекторий. Отметим, что для подобного анализа траектории лучше всего подходят не мгновенные параметры, а усредненные в скользящем окне, имеющие более гладкий характер.

Скорость - параметр траектории, наиболее явно выражающий характер полета. На рис. 3 показаны графики скорости и ее СКО. Очень характерны при этом участки кружения. Если на прямолинейном участке средняя скорость птицы находится в пределах 13...17 м/с, то при кружении она резко снижается ло 2...6 м/с. Достаточно характерно ведет себя и СКО скорости при кружении – если в обычных условиях его значение находится в пределах 1 м/с, то в моменты снижения и увеличения скорости возрастает до 5 м/с. В сам момент кружения СКО примерно такое же, как и при ровном полете. Заметим, что среднее и СКО чувствительны к "выбросам" значений скорости, поэтому обнаружение стадии кружения по скорости надежнее.

В свою очередь, ускорение полета птицы (рис. 4) также зависит от вида движения. На стадии ровного полета ускорение, как и должно быть, колеблется около нуля, не превышая в основном значений ± 0.1 м/с², тогда как на участках набора скорости и ее сброса ускорение (замедление) достигает значения ± 0.4 м/с².



Fig. 3. Bird flight path: velocity and standard deviation

44

Экспериментальное исследование траекторных признаков для распознавания низколетящих малоскоростных радиолокационных целей в полуактивной РЛС Experimental Study of Trajectory Features for the Recognition of Low-Flying Low-Speed Radar Targets Using Passive Coherent Radar Systems



Puc. 4. Траектория полета птицы: ускорение и его СКО *Fig. 4.* Bird flight path: acceleration and standard deviation



Fig. 5. Bird flight path: course and standard deviation

Особый интерес представляет анализ курса и его СКО (рис. 5). Движение в режиме кружения характеризуется постоянной сменой курса, в результате чего в эти моменты его значение меняется в больших пределах (изрезанность синей линии) и СКО курса принимает большие значения – в среднем до 50...70°, возможны выбросы выше 140°. По-видимому, СКО курса является, наряду со скоростью, лучшим индикатором для обнаружения кружения. Если в обычном режиме СКО курса колеблется в пределах 5...10°, максимум 15°, то при кружении его значение находится на уровне 80...100° и 95...120°.

Угловая скорость поворота (или просто скорость поворота, рис. 6) вычисляется как производная от измеренного курса. Средняя скорость поворота в режиме прямолинейного полета колеблется около нуля (± 1 °/c), тогда как в режиме кружения она принимает значения в диапазоне ± 8 °/c. СКО скорости поворота на участках ровного движения имеет значения в пределах 1...3 °/c, при кружении для него характерны значения в диапазоне 15...60 °/c.

В 47 из 122 исследованных траекторий птиц зафиксированы участки кружения, ровное движение – у всех. Результаты исследований



Puc. 6. Траектория полета птицы: скорость поворота и ее СКО *Fig. 6.* Bird flight path: turn rate and standard deviation

Табл. 3. Траекторные признаки птиц на разных участках *Tab. 3.* Tracking Characteristics of Birds

	Значение параметра		
Параметр	Кружение	Ровный	
	15	полет	
Скорость, м/с	27	525	
СКО скорости, м/с	7	35	
Ускорение, м/с ²	04	00.5	
СКО ускорения, м/с ²	0.71	0.72	
СКО курса,°	70170	050	
Скорость поворота, °/с	030	020	
СКО скорости поворота, °/с	1525	110	

траекторных параметров по всем участкам движения приведены в табл. 3.

Таким образом, для птицы, которой принадлежит рассматриваемая траектория, можно выделить 2 способа полета: ровный и кружение, существенно различающиеся значениями траекторных признаков. Режим кружения отличается снижением скорости и возрастанием всех значений СКО.

Траекторные характеристики малых БВС. В ходе экспериментальных исследований траектории БВС использовался квадрокоптер DJI Phantom 3, который относится к популярным малым беспилотным летательным аппаратам. DJI Phantom 3 имеет габаритные размеры 40×40×19 см, максимальная горизонтальная скорость полета – 16 м/с (режим АТТІ, нет ветра). В данной статье представлены результаты исследований траектории его полета, проведенные с целью уточнения летных характеристик БВС на различных участках полета для решения задачи распознавания.

На рис. 7 приведен пример траектории DJI Phantom 3, содержащей 118 отметок.

45



Puc. 7. Траектория полета БВС в ПСК *Fig.* 7. The flight path of UAVs in Cartesian coordinates system



Puc. 8. Траектория полета БВС: скорость и ее СКО *Fig. 8.* The flight path of UAVs: velocity and standard deviation

Анализируемые эксперименты показали, что БВС, которые должны быть идентифицированы, большую часть времени будут двигаться в режиме ровного полета (т. е. по прямой или плавной дуге с постоянной скоростью), поэтому для распознавания БВС целесообразно использовать его траекторные параметры, характерные для этого режима движения. Тем не менее значения траекторных признаков сильно зависят от погодных условий, в первую очередь от скорости и направления ветра. Существенные различия траекторных признаков оказались в режимах при сопротивлении ветра и по ветру.

При движении в режиме ровного полета по ветру скорость БВС меняется в пределах 10...15 м/с с СКО 1.2...1.6 м/с (рис. 8). При сопротивлении ветра БВС летит со сниженной скоростью 6...8 м/с, СКО возрастает до 1.4...2.1 м/с. На участке перехода СКО скорости возрастает до 4 м/с.

Так как БВС летел с постоянной скоростью, его ускорение является случайным процессом с математическим ожиданием, близким к нулю. СКО ускорения меньше на первой части траектории (в пределах 0.3...0.7 м/c²) и больше (до

46



Fig. 10. The flight path of UAVs: course and standard deviation

 $0.3...0.8 \text{ м/c}^2$) на второй (рис. 9). Хотя в целом при прямолинейном полете с постоянной скоростью ускорение (как среднее, так и СКО), повидимому, не сможет стать надежным идентификационным признаком БВС.

Полет против ветра сказался и на СКО курса, которое составляет в пределе 2.5...5° при полете без ветра и около 7...8° при сопротивлении ветра (рис. 10). Следовательно, значение СКО курса также сильно зависит от условий среды. На участке перехода СКО курса возрастает до 50°.

При прямолинейном движении скорость поворота на подветренных участках находится в пределах 0.3...1 °/c со средним значением около 0.3 °/c, на участках сопротивления ветра разброс гораздо выше: от -0.5 до 2.5 °/c (рис. 11). Это сказывается и на СКО: в первом случае СКО находится в пределах 1.5...3.1 °/c, во втором около 3 °/c и до 7 °/c в моменты выбросов.

В табл. 4 представлены результаты экспериментального анализа траекторных признаков БВС на разных участках.

На основе анализа траекторий реальных БВС и птиц установлено, что каждая из этих целей имеет разные режимы движения. Движение БВС при сопротивлении ветра и ровный



Puc. 11. Траектория полета БВС: скорость поворота и ее СКО *Fig. 11.* The flight path of UAVs: turn rate and standard deviation

Табл. 4. Траекторные призна	аки БВС на разных участках
<i>Tab.</i> 4. Tracking cha	racteristics of UAVs

Полохота	Значение параметра		
Параметр	По ветру	Против ветра	
Скорость, м/с	10.511	77.5	
СКО скорости, м/с	1.62.2	1.22.2	
Ускорение, м/с ²	0.1	0.1	
СКО ускорения, м/с ²	0.40.6	0.40.6	
СКО курса,°	2.55	78	
Скорость поворота, °/с	0.52	25	
СКО скорости поворота, °/с	0.2	0.71	

полет птицы (без его дифференцирования по степени воздействия ветра) имеют практически идентичные траекторные признаки, и поэтому их разделение не представляется возможным, по крайней мере до появления более полного статистического описания. С другой стороны, режим кружения птицы характерен именно для нее, а параметры ровного полета БВС без сопротивления ветра в среднем заметно отличаются от аналогичных параметров ровного полета птицы. Соответственно, распознавание по траекторным признакам имеет 2 этапа: обнаружение режима кружения и оценка параметров траектории в режиме ровного полета.

Участком кружения признается часть траектории со следующими параметрами:

- средняя скорость цели в пределах 1...6 м/с;

– СКО курса более 15°;

максимум модуля скорости поворота не менее 15°/с;

- СКО скорости поворота более 8 °/с;

– длина участка (в отметках) не менее 10.

Участком ровного движения считается часть траектории, у которой СКО скорости не превышает 2 м/с, а длина участка в отметках не менее 20.

Если при этом на данном участке:

– средняя скорость более 10 м/с;

- СКО курса не более 4°;

– максимум модуля скорости поворота не более 2 °/с ;

- СКО скорости поворота не более 1°/с,

можно заключить, что данная траектория принадлежит БВС, движущемуся без сопротивления ветра.

Дополнительные возможности по распознаванию классов целей и участков траекторий может дать использование метеорологических датчиков, предоставляющих данные о скорости и направлении ветра.

Выводы. В ходе экспериментальных исследований был проведен анализ траекторных признаков низколетящих целей (птицы и БВС). Анализ показал возможность практического использования траекторных признаков для решения задачи распознавания низколетящих целей. Каждый тип целей может иметь как минимум по 2 различающихся режима движения. Для БВС это движение по ветру и против ветра, для птиц – режимы кружения и ровного полета. Участки кружения наблюдаются только в траектории полета птиц, такие участки характеризуются снижением скорости и выбросом СКО всех траекторных параметров. Траекторные параметры БВС сильно зависят от погодных условий. Для построения моделей движения птиц и БВС необходимо учитывать такие особенности. При наблюдении маневра целесообразно использовать значения СКО скорости, курса, скорости поворота.

Список литературы

1. Drone-vs-Bird Detection Challenge at IEEE AVSS2021 / A. Coluccia, A. Fascista, A Schumann., et al. // 17th IEEE Intern. Conf. on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS), Washington, USA, 16–19 Nov. 2021. IEEE, 2021. P. 1–8. doi: 10.1109/AVSS52988.2021.9663844 2. Павлушенко М. И., Евстафьев Г. М., Макаренко И. К. Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза распространения и перспективы развития // Науч. зап. ПИР-центра: Национальная и глобальная безопасность. 2004. № 2 (26). 612 с.

Экспериментальное исследование траекторных признаков для распознавания низколетящих малоскоростных радиолокационных целей в полуактивной РЛС Experimental Study of Trajectory Features for the Recognition

.....

of Low-Flying Low-Speed Radar Targets Using Passive Coherent Radar Systems

^{3.} Методы радиолокационного распознавания и их

моделирование / Я. Д. Ширман, С. А.Горшков, С. П. Лещенко, Г. Д. Братченко, В. М. Орленко // Науч.техн. сер. Радиолокация и радиометрия. № 2. Радиолокационное распознавание и методы математического моделирования. 2000. Вып. 3. С. 5–65.

4. Бондарев А. Н., Киричек Р. В. Обзор беспилотных летательных аппаратов общего пользования и регулирования воздушного движения БВС в разных странах //Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4, № 4. С. 13–23.

5. Воробьев Е. Н. Исследование сигнальных признаков распознавания малых БПЛА в полуактивной РЛС // Вестн. Новг. гос. ун-та. Сер. Техн. науки. 2019. № 4 (116). С. 72–77. doi: 10.34680/2076-8052.2019.4(116).72-77

6. Купряшкин И. Ф., Соколик Н. В. Алгоритм обработки сигналов в радиолокационной системе с непрерывным частотно-модулированным излучением в интересах обнаружения малозаметных воздушных объектов, оценки их дальности и скорости движения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 1. С. 39–47. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-1-39-47

7. Coluccia A., Parisi G., Fascista A. Detection and Classification of Multirotor Drones in Radar Sensor Networks: A Review // Sensors. 2020. Vol. 20, iss. 15. P. 4172. doi: 10.3390/s20154172

8. Мацюра А. В. Миграция птиц и метеорологические параметры: краткий обзор. Ч. 1 // Acta Biologica Sibirica. 2015. Т. 1, № 1–2. С. 117–131. doi: 10.14258/abs.v1i1-2.854

9. Osadchyi V. V., Yeremeev V. S., Matsyura A. V. Cluster Analysis, Fuzzy Sets, and Fuzzy Logic Models in Bird Identification // Ukrainian J. of Ecology. 2017. Vol. 7, № 2. P. 96–103. doi: 10.15421/2017_25

10. Malsev K., Yaroslavsky L., Leshem Y. Processing of Weather Radar Images for Bird Detection and Tracking //

The Seventh IASTED Intern. Conf. on Visualization, Imaging and Image Processing, Palma de Mallorca, Spain, 29– 31 Aug. 2007. C. 106–111.

11. Скорость полета птиц. Таблица. URL: https://cyberlesson.ru/skorost-poleta-ptic-tablica/ (дата обращения 11.10.2021)

12. UAV Target Detection Algorithm Using GNSS-Based Bistatic Radar / H. Zeng, H. Zhang, J. Chen, W. Yang // IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 2019 (IGARSS 2019), Yokohama, Japan, 28 July – 2 Aug. 2019. IEEE, 2019. P. 2167–2170. doi: 10.1109/IGARSS.2019.8898935

13. An X-Band FMCW Radar for Detection and Tracking of Miniaturized UAVs / J. Lee, M. Park, I. Eo, B. Koo // Intern. Conf. on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), Las Vegas, USA, 14–16 Dec. 2017. IEEE, 2017. P. 1844–1845. doi: 10.1109/CSCI.2017.342

14. Patel J. S., Fioranelli F., Anderson D. Review of Radar Classification and RCS Characterisation Techniques for Small UAVs or Drones // IET Radar, Sonar & Navigation. 2018. Vol. 12, iss. 9. P. 911–919. doi: 10.1049/ietrsn.2018.0020

15. DVB-T2 passive radar developed at Saint Petersburg Electrotechnical University / E. Vorobev, A. Barkhatov, V. Veremyev, V. Kutuzov // 22nd Intern. Microwave and Radar Conf. (MIKON), Poznan, Poland, 14–17 May 2018. IEEE, 2018. P. 204–207. doi: 10.23919/MIKON.2018.8405178

16. Пассивная когерентная радиолокация / А. В. Бархатов, В. И. Веремьев, Е. Н. Воробьев, А. А. Коновалов, Д. А. Ковалев, В. М. Кутузов, В. Н. Михайлов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2016. 163 с.

17. Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Ч. 2. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. 180 с.

Информация об авторах

Дао Ван Лук – специалист по направлению "Радиоэлектронные системы и комплексы" (2016), аспирант Государственного технического института им. Ле Куй Дона (Ханой, Вьетнам). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокация; вторичная и третичная обработка радиолокационной информации.

Адрес: Государственный технический институт им. Ле Куй Дона, ул. Хоанг Куок Вьет, д. 236, район Бак Ты Лием, Ханой, Вьетнам

E-mail: daolucvtl01@gmail.com

https://orcid.org/0000-0001-8006-3076

Коновалов Александр Анатольевич – кандидат технических наук (2015), старший научный сотрудник НИИ "Прогноз". Автор 52 научных работ. Сфера научных интересов – вторичная и третичная обработка радиолокационной информации; объединение данных, многопозиционная радиолокация; бистатические радиотехнические системы.

Адрес: НИИ "Прогноз", ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия E-mail: al_an_kon@mail.ru

Ле Минь Хоанг – специалист по направлению "Радиоэлектронные системы и комплексы" (2017), аспирант Государственного технического института им. Ле Куй Дона (Ханой, Вьетнам). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокация; вторичная и третичная обработка радиолокационной информации.

Адрес: Государственный технический институт им. Ле Куй Дона, ул. Хоанг Куок Вьет, д. 236, район Бак Ты Лием, Ханой, Вьетнам

E-mail: lehoang.navy@gmail.com

https://orcid.org/0000-0001-8913-3296

References

1. Coluccia A., Fascista A., Schumann A. et al. Drone-vs-Bird Detection Challenge at IEEE AVSS2021. 17th IEEE Intern. Conf. on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS). Washington, USA, 16–19 Nov. 2021. IEEE, 2021, pp. 1–8. doi: 10.1109/AVSS52988.2021.9663844

2. Pavlushenko M. I., Evstafev G. M., Makarenko I. K. Unmanned Aerial Vehicles: History, Application, Threat of Proliferation and Development Prospects. PIR Center Study Papers: Russia and Global Security. 2004, no. 2 (26), 612 p. (In Russ.)

3. Shirman Ia. D., Gorshkov S. A., Leshchenko S. P., Bratchenko G. D., Orlenko V. M. Methods of Radar Recognition and Their Simulation. Science-Technical Series. Radiolocation and Radiometry no. 2. Radar Recognition and Methods for Mathematical Simulation. 2000, iss. 3, pp. 5–65. (In Russ.)

4. Bondarev A. N., Kirichek R. V. Overview of Unmanned Aerial Apparatus for General use and Regulation of Air UAV Movement in Different Countries. Telecom IT. 2016, vol. 4, iss. 4, pp. 13–23. (In Russ.)

5. Vorobyov E. N. Investigation of Distinctive Features for Recognition of Small UAVs in Passive Radar. Vestnik NovSU. Iss.: Engineering Sciences. 2019, no. 4 (116), pp. 72–77. doi: 10.34680/2076-8052.2019.4(116).72-77 (In Russ.)

6. Kupryashkin I. F., Sokolik N. V. Algorithm of Signal Processing in the Radar System with Continuous Frequency Modulated Radiation for Detection of Small-Sized Aerial Objects, Estimation of their Range and Velocity. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 1, pp. 39–47. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-1-39-47

7. Coluccia A., Parisi G., Fascista A. Detection and Clas-sification of Multirotor Drones in Radar Sensor Net-works: A Review. Sensors. 2020, vol. 20, iss. 15, p. 4172. doi: 10.3390/s20154172

8. Matsyura A. V. Bird Migration and Meteorological Parameters – A Review (Part I). Acta Biologica Sibirica. 2015, vol. 1, no. 1–2, pp. 117–131. doi: 10.14258/abs.v1i1-2.854

9. Osadchyi V. V., Yeremeev V. S., Matsyura A. V. Cluster Analysis, Fuzzy Sets, and Fuzzy Logic Models

in Bird Identification. Ukrainian J. of Ecology. 2017, vol. 7, no. 2, pp. 96–103. doi: 10.15421/2017 25

10. Malsev K., Yaroslavsky L., Leshem Y. Processing of Weather Radar Images for Bird Detection and Tracking. The Seventh IASTED Intern. Conf. on Visualization, Imaging and Image Processing. Palma de Mallorca, Spain, 29–31 Aug. 2007, pp. 106–111.

11. Bird flight speed table. Available at: https://cyberlesson.ru/skorost-poleta-ptic-tablica/ (accessed 11.10.2021)

12. Zeng H., Zhang H., Chen J., Yang W. UAV Target Detection Algorithm Using GNSS-Based Bistatic Radar. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 2019 (IGARSS 2019), Yokohama, Japan, 28 July – 2 Aug. 2019. IEEE, 2019, pp. 2167–2170. doi: 10.1109/IGARSS.2019.8898935

13. Lee J., Park M., Eo I., Koo B. An X-Band FMCW Radar for Detection and Tracking of Miniaturized UAVs. Intern. Conf. on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), Las Vegas, USA, 14–16 Dec. 2017. IEEE, 2017, pp. 1844–1845. doi: 10.1109/CSCI.2017.342

14. Patel J. S., Fioranelli F., Anderson D. Review of Radar Classification and RCS Characterisation Techniques for Small UAVs or Drones. IET Radar, Sonar & Navi-gation. 2018, vol. 12, iss. 9, pp. 911–919. doi: 10.1049/iet-rsn.2018.0020

15. Vorobev E., Barkhatov A., Veremyev V., Kutuzov V. DVB-T2 Passive Radar Developed at Saint Petersburg Electrotechnical University. 22nd Intern. Microwave and Radar Conf. (MIKON). Poznan, Poland, 14–17 May 2018. IEEE, 2018, pp. 204–207. doi: 10.23919/MIKON.2018.8405178

16. Barkhatov A. V., Veremyev V. I., Vorobev E. N., Konovalov A. A., Kovalev D. A., Kutuzov V. M, Mikhailov V. N. *Passivnaya kogerentnaya radiolokaciya* [Passive Coherent Radar]. SPb, *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2016, 163 p. (In Russ.)

17. Konovalov A. A. *Osnovy traektornoy obrabotki* radiolokatsyonnoy informatsii [Basic of the Radar Target Tracking]. Part II. SPb, *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2014, 180 p. (In Russ.)

Information about the authors

Dao Van Luc, Specialist in Specialty "Radioelectronic systems and complexes" (2016), postgraduate student of Le Quy Don Technical University (Hanoi, Vietnam). The author of 2 scientific publications. Area of expertise: radiolocation; secondary and tertiary processing of radar information.

Address: Le Quy Don Technical University, 236 Hoang Quoc Viet St., Bac Tu Liem, Ha Noi, Viet Nam E-mail: daolucvtl01@gmail.com https://orcid.org/0000-0001-8006-3076

Aleksandr A. Konovalov, Cand. Sci. (Eng.) (2015), Senior Researcher, Research Institute "Prognoz" St. Petersburg State Electrotechnical University. The author of 53 scientific publications. Area of expertise: secondary and tertiary processing of radar information; data fusion; multi-position radar; bistatic radio systems. Address: Research Institute "Prognoz", 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: al an kon@mail.ru

Le Minh Hoang, Specialist in Specialty "Radioelectronic systems and complexes" (2017), postgraduate student of Le Quy Don Technical University (Hanoi, Vietnam). Area of expertise: radiolocation; secondary and tertiary processing of radar information.

Address: Le Quy Don Technical University, 236 Hoang Quoc Viet St., Bac Tu Liem, Ha Noi, Viet Nam E-mail: lehoang.navy@gmail.com

https://orcid.org/0000-0001-8913-3296

Радиолокация и радионавигация УДК 621.396.969.34; 621.396.969.181.2 https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-3-51-61

Оригинальная статья

Особенности обнаружения беспилотных воздушных судов с применением посадочного радиолокатора

Е. А. Рубцов^{1⊠}, А. В. Федоров¹, Н. В. Поваренкин², Аль-Рубой Мудар³

¹Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

³Министерство обороны Ирака, Командование ВВС, Багдад, Ирак

[™] rubtsov.spb.guga@rambler.ru

Аннотация

Введение. В последние годы увеличилось количество инцидентов, связанных с беспилотными воздушными судами (БВС), поэтому их обнаружение в аэродромной зоне является важной задачей. Ее можно решить с помощью специализированных средств наблюдения, однако это потребует проведения процедур сертификации, подтверждающих эффективность и безопасность их применения. В связи с этим в ближнесрочной перспективе целесообразно использовать штатные средства. В секторе захода на посадку эту задачу может решить посадочный радиолокатор. Малая эффективная площадь рассеяния (ЭПР) БВС приводит к уменьшению максимальной дальности действия и появлению слепых зон, в пределах которых аппарат не может быть обнаружен.

Цель работы. Анализ возможности обнаружения БВС с помощью посадочного радиолокатора, оценка максимальной дальности обнаружения, слепых зон и разработка рекомендаций по их уменьшению.

Материалы и методы. Использован аналитический метод определения максимальной дальности обнаружения для посадочного радиолокатора с учетом особенностей БВС, а также метод оценки дальности обнаружения низколетящей цели с учетом влияния подстилающей поверхности.

Результаты. На примере посадочного радиолокатора RP-5G определены максимальные дальности обнаружения, которые составили 380, 2730, 4480 и 14 350 м для БВС с ЭПР 0.01, 0.05, 0.1 и 0.5 м². Протяженность слепой зоны RP-5G составила 4620, 2270 и 1019 м для БВС с ЭПР 0.01, 0.05 и 0.1 м². При ЭПР аппарата 0.5 м² и более слепая зона отсутствует.

Заключение. Выражения для расчета максимальной дальности обнаружения и слепых зон, а также полученные результаты помогут в оценке особенностей наблюдения БВС в аэродромной зоне (секторе посадки). Для наблюдения аппаратов с ЭПР более 0.5 м² возможно применение штатных посадочных радиолокаторов. Для БВС с ЭПР 0.1...0.5 м² целесообразно внедрить модернизированные посадочные радиолокаторы с увеличенной энергией зондирующего импульса.

Ключевые слова: безопасность полетов, беспилотное воздушное судно, посадочный радиолокатор, эффективная площадь рассеяния, обнаружение, слепая зона

Для цитирования: Особенности обнаружения беспилотных воздушных судов с применением посадочного радиолокатора / Е. А. Рубцов, А. В. Федоров, Н. В. Поваренкин, Аль-Рубой Мудар // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 3. С. 51–61. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-51-61

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 28.03.2022; принята к публикации после рецензирования 16.05.2022; опубликована онлайн 28.06.2022



Radar and Navigation

Original article

Features of Unmanned Aircraft Detection Using Precision Approach Radar

Evgeny A. Rubtsov^{1⊠}, Andrey V. Fedorov¹, Nikolay V. Povarenkin², Al-Rubaye Mudher³

¹Saint Petersburg State University of Civil Aviation, St Petersburg, Russia

²Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia

³Iraqi ministry of defense, Air force command, Baghdad, Iraq

[™] rubtsov.spb.guga@rambler.ru

Abstract

Introduction. The increasing number of incidents involving unmanned aerial vehicles (UAVs) makes their detection in the aerodrome area an important task, which can be solved by specialized surveillance means. However, the application of such means requires certification procedures confirming the effectiveness and safety of their use. Therefore, in the short term, it seems reasonable to use standard technologies. In the approach sector, this task can be solved by precision approach radar systems. The small radar cross-section (RCS) of UAVs leads to a decrease in the maximum range and the appearance of blind spots, within which the vehicle cannot be detected.

Aim. Analysis of the possibility of detecting UAVs using a precision approach radar, assessing the maximum detection range, blind spots and developing recommendations for their reduction.

Materials and methods. An analytical method was used for determining the maximum detection range for a precision approach radar, taking into account UAV characteristics. A method for estimating the detection range of a low-flying target, taking into account the influence of the underlying surface, was also used.

Results. Using the example of the precision approach radar RP-5G, the maximum detection ranges were determined, which amounted to 380, 2730, 4480 and 14350 m for UAVs with an RCS of 0.01, 0.05, 0.1 and 0.5 m², respectively. The length of the blind spots of the RP-5G was 4620, 2270, 1019 m for UAVs with an RCS of 0.01, 0.05, 0.1 m², respectively. Under the vehicle RCS of 0.5 m² and greater, no blind spots are observed.

Conclusion. Analytical expressions for calculating the maximum detection range and blind spots were obtained. The results can be used when assessing specific features of UAV observation in the aerodrome area (landing sector). Standard precision approach radar systems can be used when surveying UAVs with an RCS greater than 0.5 m². For UAVs with an RCS of 0.1...0.5 m², modernized precision approach radar systems with an increased probing pulse energy should be implemented.

Keywords: flight safety, unmanned aircraft, precision approach radar, radar cross section, detection, blind spot

For citation: Rubtsov E. A., Fedorov A. V., Povarenkin N. V., Al-Rubaye Mudher. Features of Unmanned Aircraft Detection Using Precision Approach Radar. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 51–61. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-51-61

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

Submitted 28.03.2022; accepted 16.05.2022; published online 28.06.2022

Введение. С ростом количества беспилотных воздушных судов (БВС) возрастает частота происшествий и инцидентов, среди которых особое место занимает опасное сближение с пилотируемыми воздушными судами и вмешательство в работу аэродромов.

С каждым годом фиксируется рост количества происшествий и потенциально опасных ситуаций в аэродромной зоне, связанных с полетами БВС. Первая подобная потенциально опасная ситуация была зафиксирована в июле 2014 г. в аэропорту Хитроу (Великобритания), когда неопознанное БВС пролетело менее чем в

.....

6 м от заходящего на посадку Airbus A320. В целом, в Великобритании число подобных инцидентов в 2014-2015 гг. составило 35 случаев, а в 2018-2019 гг. уже 290 случаев [1]. В Германии в 2017 г. было зафиксировано 88 потенциально опасных случаев с участием БВС и 158 случаев – в 2018 г. [2]. Особенно опасны столкновения БВС с пилотируемыми воздушными судами. Так, в сентябре 2020 г. произошло столкновение любительского аппарата с вертолетом департамента полиции Лос-Анжелеса, в результате чего вертолет получил значительные повреждения и потребовалась

52

экстренная посадка. Особую опасность представляет полет БВС в секторе захода воздушных судов на посадку, так как повреждение самолетов, находящихся на малой высоте и имеющих сравнительно небольшую скорость, с большой вероятностью приведет к серьезному инциденту или катастрофе.

Для защиты важных объектов, в том числе аэропортов, производители БВС обеспечивают на программном уровне запрет выполнения полетов в запрещенных зонах, что подразумевает невозможность нарушения воздушного пространства аэропортов законопослушными гражданами [3]. При этом существуют способы снятия этих ограничений внесением изменений в программный код продукта (прошивку).

Таким образом, актуальной становится задача обнаружения БВС-нарушителей, выполняющих полет в аэродромной зоне, особенно в секторе захода воздушных судов на посадку. В настоящее время разработаны и прошли испытания специализированные средства наблюдения для обнаружения БВС, в которых применяются следующие способы обнаружения [4]:

 применение тепловизоров и температурных сканеров инфракрасного диапазона;

– применение оптических камер и сканеров;

 применение специализированных радиолокационных станций;

- осуществление радиомониторинга;

– акустическое обнаружение БВС.

Для обеспечения наблюдения в темное время суток и в сложных метеоусловиях целесообразно применять радиолокационные средства. При этом возможны 2 варианта решения проблемы обнаружения БВС: применение специализированных радиолокационных систем либо применение штатных радиолокационных систем (с возможной их доработкой для обнаружения БВС с требуемыми характеристиками).

В качестве примера специализированного радиолокатора можно привести систему Robin Radar Systems IRIS, способную обнаруживать БВС, с размерами, соответствующими DJI Inspire, DJI Phantom и DJI Mavic Mini на удалениях 4, 3.4 и 0.8 км соответственно. В радиолокаторе применяется непрерывный сигнал с частотной модуляцией X-диапазона (8900...9650 МГц), мощность передатчика составляет 12 Вт на антенну. Для применения в аэродромной зоне необходимо оценить возможное влияние данной системы на работу средств радиотехнического обеспечения полетов (РТОП) и авиационной электросвязи (АС) [5].

Существуют системы полуактивной радиолокации, включающие в себя антенную систему, устройства приема и обработки сигналов и комплект вычислительных средств. Эти средства как правило используют для обнаружения цели сигналы цифрового эфирного телевидения стандарта DVB-T2 и сигналы FM-радиовещания. В качестве примера можно привести пассивный когерентный локационный комплекс (ПКЛ) производства АО «НИИ "Вектор"» [6].

Дальность действия ПКЛ составляет 7 км при эффективной площади рассеяния (ЭПР) цели 0.01 м² и 21 км при ЭПР 0.5 м², причем отмечено, что эти данные верны для передатчика с эквивалентной излучаемой мощностью 1 кВт и при оптимальных расстояниях между передатчиком и целью. При уменьшении мощности передатчика, а также при увеличении расстояния между целью и передатчиком дальность обнаружения ПКЛ снижается.

Важным плюсом систем пассивной радиолокации является отсутствие в комплекте аппаратуры передатчика. Однако следует отметить необходимость оптимального размещения антенных систем, которые, при несоблюдении требований Методики оценки влияния застройки приаэродромной территории на работу средств РТОП и АС (приказ Росавиации № 748-П), могут привести к ухудшению характеристик средств РТОП и АС в пределах четвертой подзоны приаэродромной территории.

Вторым вариантом решения проблемы обнаружения БВС в аэродромной зоне является применение штатных средств наблюдения, в частности посадочной радиолокационной станции (ПРЛС). ПРЛС обеспечивает наблюдение за воздушным пространством в зоне пересечения наиболее распространенных высот полета любительских БВС с этапами полета воздушных судов (ВС). Посадочные радиолокаторы эксплуатируются в ряде аэропортов по всему миру, поэтому применение ПРЛС снимает необходимость в разработке нового оборудования и включения его в систему управления воздушным движением [7]. В статье рассматривается возможность применения ПРЛС для обнаружения малоразмерных целей в секторе захода на посадку и анализируются особенности, связанные с обнаружением БВС.

Методы. Для оценки возможности обнаружения БВС при помощи ПРЛС необходимо проанализировать максимальную дальность, на которой радиолокатор способен обнаружить цель с заданными параметрами, т. е. зону действия радиолокатора. Для упрощенной оценки максимальной дальности обнаружения воспользуемся основным уравнением радиолокации [8]:

$$R_{\max} = 4 \sqrt{\frac{G_t A_r \sigma E_t}{\left(4\pi\right)^2 \zeta N_0}},\tag{1}$$

где G_t — коэффициент усиления антенны радиолокатора в направлении максимума диаграммы направленности; A_r — эффективная площадь антенны; σ — ЭПР цели; E_t — энергия зондирующего импульса; ζ — порог обнаруживаемости цели (определяется вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги); N_0 — шумовая составляющая сигнала (в отсутствие активных помех может быть аппроксимирована белым шумом).

Приведенные в (1) параметры находятся исходя из эксплуатационных характеристик либо являются общепринятыми константами. Коэффициент усиления рассчитывается как

$$G_t = \frac{4\pi A_r}{\lambda^2},\tag{2}$$

где λ – длина волны зондирующего импульса.

Шумовая составляющая сигнала определяется как

$$N_0 = kTF, \tag{3}$$

где $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж · К⁻¹ – постоянная Больцмана; *T* – шумовая температура приемника (в нормальных условиях может быть принята равной 300 К); *F* – коэффициент шума.

Энергия зондирующего импульса находится как

$$E_t = P_t \tau,$$

где *P_t* – импульсная мощность передатчика; τ – длительность зондирующего импульса.

Выражение (1) может применяться для первоначальной оценки максимальной дальности обнаружения БВС. При наблюдении низколетящих целей необходимо учитывать пассивные помехи, вызванные отражением радиоволн от подстилающей поверхности и местных объектов, а также изменения ЭПР цели, вызванные влиянием подстилающей поверхности (ПП) [9].

Для обнаружения цели в этих условиях необходимо обеспечить требуемое отношение мощностей сигналов, отраженных от БВС $(P_{\text{БВС}})$ и от подстилающей поверхности $(P_{\Pi\Pi})$. Примем для дальнейших расчетов требуемое отношение равным 20 дБ [10].

Из основного уравнения радиолокации мощность отраженного от БВС сигнала находится как [8]

$$P_{\rm BBC} = \frac{P_t G_t A_r \sigma_{\rm BBC}}{(4\pi)^2 R_{\rm BBC}^4 \zeta N_0},$$

где $\sigma_{\overline{bBC}}$ – ЭПР беспилотного воздушного

судна; $R_{\text{БВС}}$ – расстояние между ПРЛС и БВС.

Мощность сигнала, отраженного от подстилающей поверхности, находится как

$$P_{\Pi\Pi} = \frac{P_t G_{t\Pi\Pi} A_r \sigma_y S_{\Pi\Pi}}{(4\pi)^2 R_{\Pi\Pi}^4 \zeta N_0},$$

где $G_{t\Pi\Pi}$ – коэффициент усиления антенны радиолокатора в направлении облучения подстилающей поверхности; σ_y – удельная ЭПР подстилающей поверхности; $S_{\Pi\Pi}$ – площадь участка подстилающей поверхности, отражающая зондирующие сигналы; $R_{\Pi\Pi}$ – расстояние между ПРЛС и центром отражающей площадки.

Экспериментальные значения удельной ЭПР земной поверхности, покрытой травой, показывают, что для радиоволны длиной 3 см при углах скольжения $\theta = 10...30^{\circ}$ она составляет -28...-25 дБ. Характер изменчивости удельной ЭПР, выраженной в децибелах, для различных видов земной поверхности может быть аппроксимирован формулой [11]

$$\sigma_{\rm y} = -20 + \frac{10 \lg \theta}{25 - 1.5 \lg \lambda}.$$

Площадь участка подстилающей поверхности, отражающая сигнал, может быть представлена в виде эллипса, большая *a* и малая *b* полуоси которого находятся как

$$a = \frac{0.5(d + 0.5\lambda) \left[K \left(K + 4h_{\Pi P \Pi C} h_{BBC} \right) \right]^{0.5}}{K + \left(h_{\Pi P \Pi C} + h_{BBC} \right)^2},$$
$$b = \frac{a \left[K + \left(h_{\Pi P \Pi C} + h_{BBC} \right)^2 \right]^{0.5}}{d + 0.5\lambda},$$

где $d = r_1 + r_2$; r_1 – расстояние от антенны ПРЛС до центра отражающей площадки (для низколетящей цели можно принять равным $R_{\Pi\Pi}$); r_2 – расстояние от БВС до центра отражающей площадки; K = l(d + 0.25l); $h_{\Pi P \Pi C}$ – высота антенны ПРЛС; $h_{\text{БВС}}$ – высота полета БВС.

Таким образом, отношение мощностей сигналов, отраженных от БВС и от подстилающей поверхности, можно выразить как

$$\frac{P_{\text{BBC}}}{P_{\Pi\Pi}} = \frac{G_t \sigma_{\text{BBC}} R_{\Pi\Pi}^4}{G_{t\Pi\Pi} \sigma_v S_{\Pi\Pi} R_{\text{BBC}}^4}.$$
 (4)

Выражение (4) позволит учесть пассивные помехи, вызванные влиянием подстилающей поверхности при наблюдении низколетящей цели.

Результаты. Для проведения расчетов рассмотрим типовые характеристики ПРЛС и БВС. В настоящее время в мире эксплуатируется достаточно большое количество ПРЛС. Наиболее распространенными являются: RP-5G в модификациях RP-5GI и RP-5NG (производства чешских компаний T-CZ и NRTS); GCA-22AL (производства литовской компании Litaktak); PAR-2090 (производства итальянского концерна Leonardo); PAR-E (производства чешской компании ELDIS) [12–16]. Также стоит упомянуть ПРЛС, применяемые на аэродромах государственной авиации: ПРЛ-27СМ (производства Компании L3HARRIS) [17, 18].

Для анализа выберем применяемый в России и за рубежом радиолокатор RP-5G. Длина волны зондирующего импульса $\lambda = 3.2$ см. Эффективная площадь антенны радиолокатора составляет 0.15 м². Отсюда коэффициент усиления G_t, рассчитанный по (2) равен 2088.8. Для вероятности правильного обнаружения 0.9 и вероятности ложной тревоги 10⁻⁶ порог обнаруживаемости цели радиолокатора RP-5G $\zeta = 5$. Коэффициент шума *F* для радиолокатора RP-5G равен 4 дБ, отсюда, исходя из (3), шумовая составляющая сигнала $N_0 = 1.66 \cdot 10^{-20}$ Дж. Импульсная мощность передатчика Pt для радиолокатора RP-5G равна 350 Вт. Передатчик радиолокатора RP-5G может генерировать импульсы длительностью 0.3·10⁻⁶ и 30·10⁻⁶ с. Первый импульс позволяет обеспечить высокую разрешающую способность при обнаружении ВС на удалении 300...5000 м; второй импульс применяется для обеспечения наблюдения ВС на дальностях 5000...40 000 м.

Важной задачей является оценка дальности обнаружения ВС (в том числе беспилотных) с малыми ЭПР с помощью конкретного посадочного радиолокатора RP-5G. Согласно рекомендациям ИКАО посадочный радиолокатор должен обеспечивать обнаружение ВС, обладаюцих ЭПР не менее 5 м². Максимальные дальности действия, найденные с применением (1), равны 10 590 и 33 488 м для короткого и длинного импульсов соответственно, что позволяет обеспечить сплошную зону действия без слепых зон. Большой интерес представляет оценка зоны действия ПРЛС при обнаружении БВС. Для решения этой задачи проанализируем типовые ЭПР беспилотных аппаратов.

В последние годы было опубликовано значительное количество научных работ, в которых представлены ЭПР БВС, полученные различными способами [19]. Часть работ посвящена проблемам обнаружения аппаратов средствами противовоздушной обороны (ПВО). В частности, в [20] указано, что типовые ЭПР малых БВС составляют 0.01...0.5 м², при этом дальность обнаружения радиолокационными средствами ПВО составляет:

1) для средств наблюдения дециметрового диапазона:

-9...16 км для БВС с ЭПР примерно 0.1 м²;

-0.8...2 км для БВС с ЭПР примерно 0.01 м²;

2) для средств наблюдения сантиметрового диапазона:

-12...25 км для БВС с ЭПР примерно 0.1 м²;

– 1.4...2.8 км для БВС с ЭПР примерно
0.01 м².

Также интерес представляют работы, направленные на анализ ЭПР конкретных моделей БВС. В [21, 22] произведен анализ ЭПР беспилотного аппарата "Орлан-10", а также дальности его обнаружения комплексом "Оса-АКМ". Среднее значение ЭПР "Орлан-10", полученное усреднением по всей круговой диаграмме с учетом горизонтальной поляризации и отсутствия воздушного винта, составляет 0.396 м²; медианное значение ЭПР, полученное усреднением по всей круговой диаграмме (для вероятности обнаружения 0.5), при горизонтальной поляризации составляет 0.036 м². Средняя ЭПР воздушного винта составляет около 0.00066 м², однако при определенных углах наблюдения может резко возрасти – до 0.12 м² [22].

В [23] произведен достаточно глубокий анализ ЭПР любительских БВС. Были получены трехмерные измерения характеристик ЭПР девяти БВС, а также ЭПР литий-ионных полимерных батарей (Li-Po). Исследования любительских БВС показали, что небольшие аппараты имеют очень низкую ЭПР и трудно обнаруживаются существующими радиолокаторами [24-26]. Также ЭПР небольших БВС и птиц похожи на определенных частотах, что может привести к увеличению ложных обнаружений [27, 28]. В [29] были измерены ЭПР для трех аппаратов: Trimble zx5, DJI Inspire 1 Pro, DJI Phantom 4 Pro. На частоте 15 ГГц среднее ЭПР Trimble zx5, DJI Inspire 1 и DJI Phantom 4 Pro составляет 0.0364, 0.0377 и 0.0314 м² соответственно. На частоте 25 ГГц средняя ЭПР Trimble zx5, DJI Inspire 1 и DJI Phantom 4 Pro составляет 0.1087, 0.0778 и 0.0576 м² соответственно. Такие низкие значения ЭПР в первую очередь связаны с конструктивными материалами аппаратов (пластик и углеродное волокно).

Примем для дальнейших расчетов среднюю ЭПР беспилотного воздушного судна в диапазоне $0.01...0.5 \text{ м}^2$. Подставив характеристики радиолокатора RP-5G и значения средних ЭПР беспилотных воздушных судов в (1), получим по 2 значения максимальной дальности обнаружения БВС: для длительности зондирующего импульса $30\cdot10^{-6}$ и $0.3\cdot10^{-6}$ с. Минимальные дальности действия ПРЛС приняты 300 и 5000 м согласно техническим характеристикам радиолокатора RP-5G. Результаты расчета максимальной дальности слепых зон представлены в табл. 1.

Анализ табл. 1 показывает, что БВС будут обнаружены радиолокатором RP-5G на сравнительно небольших удалениях: от 7080 до 18 827 м (для ЭПР 0.01...0.5 м²). Немаловажным является наличие слепых зон для целей с ЭПР менее 0.5 м². При переключении на короткие импульсы ($\tau = 0.3 \cdot 10^{-6}$ с) зона действия радиолокатора, в пределах которой возможно обнаружение БВС, уменьшится до 2239...3981 м аппаратов (для с ЭПР 0.01...0.1 м² соответственно), а протяженность слепой зоны составит 2761...1019 м. В пределах слепой зоны обнаружение БВС не гарантируется и аппарат-нарушитель может быть пропущен. Данный факт осложняется тем, что на эти удаления приходятся высоты принятия решений для первой категории посадки, а также для неточного захода на посадку. Имея информацию о наличии и размерах слепых зон бес-

Табл. 1. Результаты расчета максимальной дальности и протяженности слепых зон радиолокатора RP-5G

Tab. 1. Calculation results of the maximum range and blind spots of the RP-5G radar

ЭПР БВС, м ²	Дальность действия при $\tau = 0.3 \cdot 10^{-6}$ с, м		Дальность действия при $\tau = 30 \cdot 10^{-6}$ с, м		Слепые зоны ПРЛС (расстояния,
	min	max	min	max	на которых БВС не будет обнаружен), м
0.01	300	2239	5000	7080	2761 (22395000)
0.05	300	3348	5000	10 587	1652 (33485000)
0.1	300	3981	5000	12 590	1019 (39815000)
0.5	300	5954	5000	18 827	Отсутствует

пилотный аппарат злоумышленника может незаметно выйти на траекторию захода на посадку пилотируемого ВС и спровоцировать опасную ситуацию, которая может закончиться серьезным инцидентом или катастрофой. В связи с этим актуальной является задача разработки рекомендаций по уменьшению слепых зон существующих систем наблюдения и по разработке перспективных систем, не имеющих слепых зон при наблюдении БВС.

Для учета влияния подстилающей поверхности на возможность обнаружения низколетящей цели оценим отношение мощностей сигналов, отраженных от БВС и от подстилающей поверхности $P_{\rm БВС}/P_{\Pi\Pi}$, по (4). При этом примем высоту фазового центра антенны ПРЛС равной 3 м, удаление БВС от радиолокатора – от 300 до 15 000 м. Также примем, что БВС двигается по траектории захода на посадку пилотируемых ВС, т. е. с углом глиссады, равным 3°. Графики зависимости отношения $P_{\rm БВС}/P_{\Pi\Pi}$ от расстояния до БВС представлены на рисунке. Дальности действия при учете вли-



Зависимость отношения $P_{\text{БВС}}/P_{\Pi\Pi}$ от расстояния до БВС с ЭПР: $1-0.5; 2-0.1; 3-0.05; 4-0.01 \text{ м}^2$

Dependence of the $P_{\text{UAV}}/P_{\text{surface}}$ ratio on the distance to the UAV with RCS: 1 - 0.5; 2 - 0.1; 3 - 0.05; 4 - 0.01 m²

Табл. 2. Дальность действия радиолокатора RP-5G при требуемом отношении Рьвс/Рпп и скорректированные слепые зоны

Tab. 2	2.	RP-5G radar range at the specified PUAV/Psurface
		ratio and the corrected blind spots

ЭПР БВС, м ²	Дальность действия при отношении <i>P</i> _{БВС} / <i>P</i> _{ПП} = 20 дБ, м	Скорректированные слепые зоны ПРЛС, м
0.01	380	4620 (380 5000)
0.05	2730	2270 (27305000)
0.1	4480	Коррекция не требуется

яния подстилающей поверхности (при требуемом отношении $P_{\text{БВС}}/P_{\Pi\Pi} = 20 \text{ дБ}$) для БВС с ЭПР менее 0.1 м² оказываются меньше дальностей, найденных с применением (1), что вызывает необходимость коррекции слепых зон радиолокатора RP-5G (табл. 2). Для беспилотных воздушных судов с ЭПР 0.1 м² и более коррекция слепых зон не требуется и их значения можно брать из табл. 1.

Обсуждение. Расчеты выявили наличие слепых зон при обнаружении БВС с помощью радиолокатора RP-5G. Для БВС с ЭПР менее 0.1 м² существенное влияние на дальность обнаружения оказывает сигнал, отраженный от подстилающей поверхности, что характерно для случая обнаружения низколетящей цели. Наблюдение таких объектов потребует внедрения специализированных средств либо разработки новых посадочных радиолокаторов, учитывающих указанные особенности и способных обнаруживать цели с малыми ЭПР на требуемом удалении. Для БВС с ЭПР 0.1 м² и более уменьшить размер слепых зон без внесения изменений в конструкцию антенн можно повысив энергию зондирующего импульса E_t, для чего требуется увеличить импульсную мощность передатчика Pt и/или увеличить длительность зондирующего импульса τ (при этом стоит рассмотреть возможность применения внутриимпульсной модуляции для повышения разрешающей способности). В дальнейших исследованиях предполагается анализ возможности модернизации существующих ПРЛС и разработка требований к перспективным средствам наблюдения для решения задачи гарантированного обнаружения БВС во всей зоне лействия.

Заключение. В настоящее время в России посадочными радиолокаторами оборудованы аэродромы экспериментальной авиации, государственной авиации, а также аэродромы совместного базирования. На аэродромах гражданской авиации ПРЛС, как правило, отсутствует, при этом нарушение со стороны БВС воздушного пространства именно этих аэродромов может привести к наиболее нежелательным последствиям. В связи с этим актуальной явля-

.....

.....

ется рекомендация внедрения посадочных радиолокаторов аэродромах на гражданской авиации, а также расширения функционала ПРЛС для решения задач обнаружения беспилотных аппаратов. В настоящей статье на примере радиолокатора RP-5G было показано, что существующие ПРЛС способны обнаруживать любительские БВС, однако зона действия будет иметь слепые зоны, размеры которых составят 4620 (380...5000), 2270 (2730...5000) и 1019 (3981...5000) м для беспилотных воздушных судов с ЭПР 0.01, 0.05 и 0.1 м² соответственно. Для БВС с ЭПР 0.5 м² слепая зона отсутствует, максимальная дальность обнаружения составляет 14 350 м.

Для обнаружения БВС с ЭПР менее 0.1 м² целесообразно применять специализированные средства, прошедшие необходимые процедуры сертификации, подтверждающие эффективность и безопасность их применения в аэродромной зоне, а также новые посадочные радиолокаторы, разработанные с учетом необходимости наблюдения малоразмерных низколетящих целей.

Для обнаружения БВС с ЭПР 0.1...0.5 м² целесообразно внедрить на аэродромах гражданской авиации модернизированные ПРЛС с увеличенной энергией зондирующего импульса Е_t, что позволит уменьшить размер слепой зоны.

Для обнаружения БВС с ЭПР более 0.5 м² возможно применение штатных ПРЛС, например RP-5G, при этом необходимо учитывать ограничения по максимальной дальности действия (расчетное значение максимальной дальности действия с учетом влияния подстилающей поверхности составило 14 350 м).

Авторский вклад

Рубцов Евгений Андреевич – постановка задачи, анализ ЭПР беспилотных аппаратов, выполнение расчетов. Федоров Андрей Валерьевич – анализ потенциальных конфликтных ситуаций с БВС, обоснование актуальности исследования.

Поваренкин Николай Владимирович – теоретический анализ.

Аль-Рубой Мудар – анализ характеристик посадочных радиолокаторов, оценка практических результатов.

Author's contribution

Evgeny A. Rubtsov, problem statement, unmanned vehicles radar cross-section analyzing, performing calculations. Andrey V. Fedorov, analysis of potential conflict situations with unmanned aircraft, substantiation of the relevance of the study.

Nikolay V. Povarenkin, theoretical analysis.

Al-Rubaye Mudher, analysis of precision approach radar characteristics, evaluation of practical results.

Список литературы

1. Drone URL: disruption at airports. https://www.wtwco.com/en-US/News/2019/08/willistowers-watson-launches-drone-disruption-action-plan (дата обращения 20.03.2022)

2. Drone sighting temporarily halts air traffic in Frankfurt. URL: https://www.poandpo.com/news/drone-sightingtemporarily-halts-air-traffic-in-frankfurt-1052019529 (дата обращения 20.03.2022)

3. GEO ZONE MAP. URL: https://www.dji.com/ ru/flysafe/geo-map (дата обращения 20.03.2022)

4. Кудряков С. А., Книжниченко Н. В., Рубцов Е. А. Вопросы обеспечения безопасного использования беспилотных авиационных систем // Вестн. Санкт-Петерб. гос. ун-та гражданской авиации. 2019. № 1 (22). C. 72-84.

5. Robin Radar Systems IRIS. URL: https://www.robinradar.com/iris-counter-drone-radar? hsLang=en (дата обращения 20.03.2022)

6. Полуактивная радиолокация. Пассивный когерентный локационный URL: комплекс.

58

https://etu.ru/ru/nii-prognoz/napravleniya-issledovanij/ poluaktivnaya-radiolokaciya (дата обращения 20.03.2022)

7. Рубцов Е. А., Тюников П. Г. Определение эффективной площади рассеяния беспилотных воздушных судов при наблюдении с помощью посадочного радиолокатора // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: сб. тр. IX Междунар. науч.-практ. конф., Иркутск, Россия, 15-22 окт. 2020. С. 273-279.

8. Belous A. Handbook of Microwave and Radar Engineering. Springer, 2021. 973 p. doi: 10.1007/978-3-030-58699-7

9. Грибков А. С., Грибков В. С., Громов А. Н. Радиолокационные характеристики объектов. Методы исследования / под ред. С. М. Нестерова. М.: Радиотехника, 2015. 311 с.

10. Кхыонг Н. В. Обоснование возможности применения посадочного радиолокатора для обнаружения метеобразований // Тр. МФТИ. 2021. Т. 13, № 1 (49). C. 71-82. doi: 10.53815/20726759_2021_13_1_71

11. Миллиметровая радиолокация: методы обнаружения негауссовских сигналов / Н. С. Акиншин, Р. П. Быстров, В. Л. Румянцев, А. В. Соколов. М.: Радиотехника, 2010. 528 с.

12. Radar PAR RP-5NG. URL: https://www.nrtscz.cz/ radar-par-rp-5ng/ (дата обращения 20.03.2022)

13. Precision approach radar RP-5GI. URL: https://www.tcz.cz/radar-systems/precision-approach-radar-rp-5gi/?lang=en (дата обращения 20.03.2022)

14. GCA-22ML. URL: https://www.litaktak.com/ product/atc-systems/GCA-22ML/ (дата обращения 20.03.2022)

15. PAR 2090C Precision Approach Radar. URL: https://electronics.leonardo.com/en/products/par2090c (дата обращения 20.03.2022)

16. PAR-E Precision Approach Radar. URL: https://www.eldis.cz/en/par-e-fixed (дата обращения 20.03.2022)

17. Модуль посадочного радиолокатора ПРЛ-27СМ. URL: https://aviationunion.ru/konkurs/docs/2017/ 7/Nom_7_LEMZ.pdf (дата обращения 20.03.2022)

18. Precision Approach Radar (PAR-2020). URL: https://www.l3harris.com/sites/default/files/2020-11/ l3harris-precision-approach-radar-2020-sell-sheet-sas.pdf (дата обращения 20.03.2022)

19. Radar Countermeasures for Unmanned Aerial Vehicles / C. Clemente, F. Fioranelli, F. Colone, G. Li. London: The Institution of Engineering and Technology, 2021. 432 p.

20. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. 204 с.

21. Сухаревский О. И., Василец В. А., Ряполов И. Е. Оценивание параметров зон обнаружения беспилотного летательного аппарата "Орлан-10" радиолокационными средствами самоходного зенитного ракетного комплекса 9К33МЗ "ОСА-АКМ" // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2016. № 4 (25). С. 33–38. 22. Radar scattering characteristics of a UAV model in X-band / O. Sukharevsky, V. Vasylets, V. Orlenko, I. Ryapolov // IET Radar, Sonar and Navigation. 2020. Vol. 14, № 4. P. 532–537. doi: 10.1049/iet-rsn.2019.0243

23. Analyzing Radar Cross Section Signatures of Diverse Drone Models at mmWave Frequencies / V. Semkin, J. Haarla, T. Pairon, C. Slezak, S. Rangan, V. Viikari, C. Oestges // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 48958–48969. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2979339

24. Micro-UAV Detection and Classification from RF Fingerprints Using Machine Learning Techniques / M. Ezuma, F. Erden, C. K. Anjinappa, O. Ozdemir, I. Guvenc // IEEE Aerospace Conf. Big Sky. Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2–9 March 2019. IEEE, 2019. P. 1–13. doi: 10.1109/AERO.2019.8741970

25. Detection, Tracking and Interdiction for Amateur Drones / I. Guvenc, F. Koohifar, S. Singh, M. L. Sichitiu, D. Matolak // IEEE Communications Magazine. 2018. Vol. 56, № 4. P. 75–81. doi: 10.1109/ MCOM.2018.1700455

26. Micro-UAV Detection with a Low-Grazing Angle Millimeter Wave Radar / M. Ezuma, F. Erden, C. K. Anjinappa, W. A. Gulzar, I. Guvenc // IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), Orlando, FL, 20– 23 Jan. 2019. IEEE, 2019. P. 1–4. doi: 10.1109/ RWS.2019.8714203

27. Rahman S., Robertson D. A. In-flight RCS measurements of drones and birds at k-band and w-band // IET Radar, Sonar and Navigation. 2018. Vol. 13, N_{2} 2. P. 300–309.

28. Interference of radar detection of drones by birds / J. Gong, J. Yan, D. Li, D. Kong // Progress In Electromagnetics Research. 2019. Vol. 81. P. 1–11.

29. Ezuma M., Funderburk M., Guvenc I. Compact-Range RCS Measurements and Modeling of Small Drones at 15 GHz and 25 GHz // Proc. IEEE Radio Wireless Symp. (RWS), San Antonio, TX, 26–29 Jan. 2020. IEEE, 2020. P. 1–4. doi: 10.1109/RWS45077.2020.9050049

Информация об авторах

Рубцов Евгений Андреевич – кандидат технических наук (2015), доцент кафедры "Радиоэлектронные системы" Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – радиотехническое обеспечение полетов пилотируемых и беспилотных воздушных судов, управление воздушным движением.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, ул. Пилотов, д. 38,

Санкт-Петербург, 196210, Россия

E-mail: rubtsov.spb.guga @rambler.ru

https://orcid.org/0000-0003-2126-0015

Федоров Андрей Валерьевич – кандидат педагогических наук (2004), доцент (2012), и. о. заведующего кафедрой "Радиоэлектронные системы" Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов, радиолокация, управление воздушным движением, безопасность полетов.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, ул. Пилотов, д. 38, Санкт-Петербург, 196210, Россия

E-mail: fav1309@yandex.ru

Поваренкин Николай Владимирович – кандидат технических наук (2000), доцент (2007), заведующий кафедрой "Радиотехнические системы" Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов; радиолокация; управление воздушным движением.

Features of Unmanned Aircraft Detection Using Precision Approach Radar

Адрес: Институт радиотехники, электроники и связи, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Большая Морская, д. 67 а, Санкт-Петербург, 190000, Россия E-mail: povarenkin.nv@guap.ru

https://orcid.org/0000-0002-8535-5905

Аль-Рубой Мудар – кандидат технических наук (2016), начальник по обучению Отдела управления воздушным движением Министерства обороны Ирака. Автор более 10 научных работ. Сфера научных интересов – радиоэлектронные средства наблюдения, управление воздушным движением.

Адрес: Министерство обороны Ирака, Командование BBC, Отдел управления воздушным движением, Зеленая зона (Багдад), 10069, Ирак

E-mail: 0394061@mail.ru

References

1. Drone Disruption at Airports. Available at: https://www.wtwco.com/en-US/News/2019/08/willistowers-watson-launches-drone-disruption-action-plan (accessed 20.03.2022)

2. Fernsby C. Drone Sighting Temporarily Halts Air Traffic in Frankfurt. Post Online Media. Available at: https://www.poandpo.com/news/drone-sightingtemporarily-halts-air-traffic-in-frankfurt-1052019529 (accessed 20.03.2022)

3. GEO ZONE MAP. Available at: https://www.dji.com/ ru/flysafe/geo-map (accessed 20.03.2022)

4. Kudryakov S. A., Knizhnichenko N. V., Rubtsov E. A. Issues of Ensuring the Safe Use of Unmanned Aircraft Systems. Bulletin of the Saint Petersburg State University of Civil Aviation. 2019, no. 1 (22), pp. 72–84. (In Russ.)

5. Robin Radar Systems IRIS. Available at: https://www.robinradar.com/iris-counter-drone-radar? hsLang=en (accessed 20.03.2022)

6. Semi-Active Radar. Passive Coherent Location Complex. Available at: https://etu.ru/ru/nii-prognoz/ napravleniya-issledovanij/poluaktivnaya-radiolokaciya (accessed 20.03.2022) (In Russ.)

7. Rubtsov E. A., Tunikov P. G. Determination of the Effective Scattering Area of Unmanned Aircraft Using a Precision Approach Radar. Actual problems and prospects of civil aviation development: Proc. of the IX Intern. Scientific and Practical Conf., Irkutsk, 15–22 Okt. 2020, pp. 271–277. (In Russ.)

8. Belous A. Handbook of Microwave and Radar Engineering. Springer, 2021, 973 p. doi: 10.1007/978-3-030-58699-7

9. Gribkov A. S., Gribkov V. S., Gromov A. N *Radio-lokatsionnye kharakteristiki ob"ektov. Metody issledovani-ya* [Radar Characteristics of Objects. Research Methods]. Ed. by S. M. Nesterov. Moscow, *Radiotekhnika*, 2015, 312 p. (In Russ.)

10. Khuong N. V. Justification of the Possibility of Using a Landing Radar to Detect Meteorological Formations. Proc. of MIPT. 2021, vol. 13, no. 1 (49), pp. 71–82. doi: 10.53815/20726759_2021_13_1_71

11. Akinshin N. S., Bystrov R. P., Rumyantsev V. L., Sokolov A. V. *Millimetrovaya radiolokatsiya: metody* *obnaruzheniya negaussovskikh signalov* [Millimeter Radar: Techniques for Detecting Non-Gaussian Signals]. Moscow, *Radiotekhnika*, 2010, 528 p. (In Russ.)

12. Radar PAR RP-5NG. Available at: https://www.nrtscz.cz/radar-par-rp-5ng/ (accessed 20.03.2022)

13. Precision approach radar RP-5GI. Available at: https://www.tcz.cz/radar-systems/precision-approach-radar-rp-5gi/?lang=en (accessed 20.03.2022)

14. GCA-22ML. Available at: https://www.litaktak.com/ product/atc-systems/GCA-22ML/ (accessed 20.03.2022)

15. PAR 2090C Precision Approach Radar. Available at: https://electronics.leonardo.com/en/products/par2090c (accessed 20.03.2022)

16. PAR-E Precision Approach Radar. Available at: https://www.eldis.cz/en/par-e-fixed (accessed 20.03.2022)

17. Precision approach radar module PRL-27SM. Available at: https://aviationunion.ru/konkurs/docs/ 2017/7/Nom_7_LEMZ.pdf (accessed 20.03.2022) (In Russ.)

18. Precision Approach Radar (PAR-2020). Available at: https://www.l3harris.com/sites/default/files/2020-11/l3harris-precision-approach-radar-2020-sell-sheetsas.pdf (accessed 20.03.2022)

19. Clemente C., Fioranelli F., Colone F., Li G. *Radar Countermeasures for Unmanned Aerial Vehicles*. London, The Institution of Engineering and Technology, 2021, 432 p.

20. Makarenko S. I. *Protivodeistvie bespilotnym letatel'nym apparatam* [Countering Unmanned Aerial Vehicles]. Saint Petersburg, *High-tech technologies*, 2020, 204 p. (In Russ.)

21. Sukharevsky O. I., Vasylets V. A. Ryapolov I. E. Evaluation of the Parameters of the Detection Zones of the Orlan-10 Unmanned Aerial Vehicle by Radar Means of the 9K33M3 OSA-AKM Self-Propelled Anti-Aircraft Missile System. Science and Technology of the Air Forces of Ukraine. 2016, no. 4 (25), pp. 33–38. (In Russ.)

22. Sukharevsky O., Vasylets V., Orlenko V., Ryapolov I. Radar Scattering Characteristics of a UAV Model in X-band. IET Radar, Sonar and Navigation. 2020, vol. 14, no. 4, pp. 532–537. doi: 10.1049/iet-rsn.2019.0243

23. Semkin V., Haarla J., Pairon T., Slezak C., Rangan S., Viikari V., Oestges C. Analyzing Radar Cross

.....

Section Signatures of Diverse Drone Models at mmWave Frequencies. IEEE Access. 2020, vol. 8, pp. 48958–48969. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2979339

24. Ezuma M., Erden F., Anjinappa C. K., Ozdemir O., Guvenc I. Micro-UAV Detection and Classification from RF Fingerprints Using Machine Learning Techniques. IEEE Aerospace Conf. Big Sky, MT, USA, 2–9 March 2019, pp. 1–13. doi: 10.1109/AERO.2019.8741970

25. Guvenc I., Koohifar F., Singh S., Sichitiu M. L., Matolak D. Detection, Tracking, and Interdiction for Amateur Drones. IEEE Communications Magazine. 2018, vol. 56, no. 4, pp. 75–81. doi: 10.1109/MCOM.2018.1700455

26. Ezuma M., Erden F., Anjinappa C. K., Gulzar W. A., Guvenc I. Micro-UAV Detection with a LowGrazing Angle Millimeter Wave Radar. IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS). Orlando, FL, USA, 20–23 Jan. 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/RWS.2019.8714203

27. Rahman S., Robertson D. A. In-flight RCS Measurements of Drones and Birds at k-band and W-Band. IET Radar, Sonar and Navigation. 2018, vol. 13, no. 2, pp. 300–309.

28. Gong J., Yan J., Li D., Kong D. Interference of Radar Detection of Drones by Birds. Progress in Electromagnetics Research. 2019, vol. 81, pp. 1–11.

29. Ezuma M., Funderburk M., Guvenc I. Compact-Range RCS Measurements and Modeling of Small Drones at 15 GHz and 25 GHz. Proc. IEEE Radio Wireless Symp. (RWS). San Antonio, TX, USA, 26–29 Jan. 2020, pp. 1–4. doi: 10.1109/RWS45077.2020.9050049

Information about the authors

Evgeny A. Rubtsov, Cand. Sci. (Eng.) (2015), Associate Professor of the Department "Radio-Electronic systems" of Saint Petersburg State University of Civil Aviation. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: communications, Navigation and Surveillance maintenance of manned and unmanned aircraft, air traffic control.

Address: Saint Petersburg State University of Civil Aviation, 38, Pilotov St., St Petersburg 196210, Russia E-mail: rubtsov.spb.guga@rambler.ru

https://orcid.org/0000-0003-2126-0015

Andrey V. Fedorov, Cand. Sci. (Ped.) (2004), Associate Professor (2012), Serving Chief of Department "Radio-Electronic systems" of Saint Petersburg State University of Civil Aviation. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: digital signal processing, radiolocation, air traffic control, flight safety. Address: Saint Petersburg State University of Civil Aviation, 38, Pilotov St., St Petersburg 196210, Russia E-mail: fav1309@yandex.ru

Nikolay V. Povarenkin, Cand. Sci. (Eng.) (2000), Associate Professor (2007), Chief of Department "Radio-Electronic equipment" of Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: digital signal processing, radiolocation, air traffic control. Address: Institute of Radio Engineering, Electronics and Communications, Saint Petersburg State University of

Aerospace Instrumentation, 67a, Bolshaja Morskaja St., St Petersburg 190000, Russia

E-mail: povarenkin.nv@guap.ru

https://orcid.org/0000-0002-8535-5905

Al-Rubaye Mudher, Cand. Sci. (Eng.) (2016), Supervisor in Control Training of Iraqi Ministry of Defense Air control section. The author of more than 10 scientific publications. Area of expertise: radio electronic surveillance aids, air traffic control.

Address: Iraqi ministry of defense, Air force command, Air control section, Green Zone, Baghdad 10069, Iraq. E-mail: 0394061@mail.ru

Фотоника УДК 621.389 https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-3-62-72

Оригинальная статья

Определение оптимального спектрального состава излучения светодиодной фитолампы для стимуляции развития семян моркови и томата

А. А. Губина, Е. В. Левин, М. М. Романович [⊠], А. Э. Дегтерев, Н. О. Патоков, И. А. Ламкин, С. А. Тарасов

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

[™] mmromanovich@etu.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время светодиодное (СИД) освещение стало преобладающим во многих сферах деятельности человека, в том числе в сельском хозяйстве. С каждым годом все большей проблемой становится обеспечение населения достаточным количеством качественной продукции вследствие текущей экологической обстановки и активного роста городского населения. Для решения данной проблемы требуется разработка энергоэффективных оптических систем с целью создания оптимальных условий освещенности для ускорения роста различных типов растений и повышения качества продукции в автономных агропромышленных комплексах.

Цель работы. Определение оптимального спектрального состава излучения фитолампы, состоящей из СИД на основе AlGaInP (660 и 730 нм), на основе InGaN (440 нм) и "фитосветодиодов" (400...800 нм), для стимуляции роста и развития ростков томатов и моркови в стадии проращивания. Расчет оптической мощности СИД и плотности фотосинтетического фотонного потока (photosynthetic photon flux density, PPFD) на ее основе. Материалы и методы. Проведен ряд экспериментов, связанных с исследованием влияния различного качества и количества излучения видимого диапазона на параметры развития семян моркови и томатов, к которым относятся энергия прорастания, появление семядольных и первичных листьев, всхожесть семян, средняя длина гипокотиля и корня; выявление оптимального спектрального состава и мощности излучения для

повышения скорости роста растений.

Результаты. Показано, что досветка излучением 660 нм ростков томатов в стадии проращивания положительно влияет на всхожесть, среднюю длину ростка и корневое развитие. Наилучшие результаты всхожести и развития моркови достигаются при облучении светом коротковолнового диапазона (PPFD 243 мкмоль·с⁻¹·м⁻²), для усиления вегетативного развития моркови подходит облучение ~170 мкмоль·с⁻¹·м⁻² синего света и 86 мкмоль·с⁻¹·м⁻² красного.

Заключение. Созданные программы освещения позволят варьировать спектральный состав излучения и PPFD на разных этапах роста и развития культур, тем самым увеличивая урожайность и снижая энергозатраты. В перспективе данная технология может быть использована в космосе, так как высокая энергоэффективность в данном сегменте является принципиальной.

Ключевые слова: светодиод, фотосинтез, фотоморфогенез, хлорофилл, плотность фотосинтетического потока фотонов, спектральная характеристика

Для цитирования: Определение оптимального спектрального состава излучения светодиодной фитолампы для стимуляции развития семян моркови и томата / А. А. Губина, Е. В. Левин, М. М. Романович, А. Э. Дегтерев, Н. О. Патоков, И. А. Ламкин, С. А. Тарасов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 3. С. 62–72. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-62-72

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 19.04.2022; принята к публикации после рецензирования 23.05.2022; опубликована онлайн 28.06.2022

Photonics

Original article

Optimal Spectral Radiation Composition of a LED Phytolapm for Stimulating Carrot and Tomato Seed Development

Anastasia A. Gubina, Evgeniy V. Levin, Maria M. Romanovich ⊠, Alexander E. Degterev, Nikita O. Patokov, Ivan A. Lamkin, Sergey A. Tarasov

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

[™] mmromanovich@etu.ru

Abstract

Introduction. Light-emitting diode (LED) irradiation is widely used in various spheres of human activity, including agriculture. Due to the growing urban population and aggravating environmental situation, the problem of high-quality food provision is increasingly attracting research attention. In this context, it is important to develop energy-efficient optical systems for ensuring optimal irradiation conditions for accelerating the growth of various types of plants and improving the quality of products in autonomous agro-industrial complexes.

Aim. Determination of an optimal spectral radiation composition of a phytolamp consisting of LEDs based on

AlGaInP (660 and 730 nm) and InGaN (440 nm), as well as phyto-LEDs (400...800 nm), to stimulate the growth and development of tomato and carrot sprouts at the germination stage. Calculation of the LED optical power and photosynthetic photon flux density (PPFD).

Materials and methods. Experiments were carried out to study the influence of visible radiation of different quality and quantity on the development parameters of carrot and tomato seeds, including germination energy, the appearance of cotyledon and primary leaves, seed germination, average hypocotyl and root length. Optimal spectral composition and radiation power parameters ensuring effective growth of plants were determined.

Results. Additional 660-nm irradiation of tomato sprouts at the germination stage was shown to exhibit a positive effect on germination, average sprout length and root development. The best results of carrot germination and development were achieved when irradiated with short-wavelength light (PPFD 243 µmol·s⁻¹·m⁻²). Irradiation of $\sim 170 \,\mu$ mol·s⁻¹·m⁻² blue and 86 μ mol·s⁻¹·m⁻² red light was found to be effective for enhancing carrot cultivation.

Conclusion. The developed irradiation schemes can be used to vary the spectral radiation composition and PPFD at different stages of crop growth and development, thereby increasing yields and reducing energy costs. In the future, this technology can be used in space research, where high energy efficiency is fundamental.

Keywords: LED, photosynthesis, photomorphogenesis, chlorophyll, photosynthetic photon flux density, spectral characteristic

For citation: Gubina A. A., Levin E. V., Romanovich M. M., Degterev A. E., Patokov N. O., Lamkin I. A., Tarasov S. A. Optimal Spectral Radiation Composition of a LED Phytolapm for Stimulating Carrot and Tomato Seed Development. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 62–72. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-62-72

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

Submitted 19.04.2022; accepted 23.05.2022; published online 28.06.2022

Введение. На рост и развитие растений влияет излучение, длины волн которого попадают в диапазон фотосинтетически активной радиации (ФАР). При этом существующие в растении пигменты и фоторецепторы, способные реагировать на свет, чувствительны к излучению только определенных длин волн. В ходе исследований [1] было выявлено, что в стадии проращивания наиболее благоприятное воздействие на растения оказывает длинноволновая область видимой части электромагнитного спектра. Для досветки растений в качестве

эффективных источников излучения используют полупроводниковые светоизлучающие диоды (СИД) на основе различных твердых растворов, таких, как InGaN, GaAlAs и AlGaInP. Физические свойства и состав соединения материала активной области влияют на главную характеристику СИД – спектральную характеристику и, как следствие, на длину волны излучения. Также от электрических характеристик светодиода зависят оптическая мощность излучения и плотность фотосинтетического фотонного потока (photosynthetic photon flux

density, PPFD), т. е. величины, значение которой определяет эффективность досветки (например, для томатов минимальное необходимое значение PPFD составляет 185...200 мкмоль:c⁻¹·м⁻² [2]).

В результате химических и энергетических реакций энергия света, поглощенного фоточувствительными пигментами растения, преобразуется в химическую. Основной энергетической реакцией, протекающей в зеленом листе растения, является фотосинтез – процесс поглощения кванта света молекулой и дальнейшее использование его энергии для синтеза молекулы аденозинтрифосфата (АТФ) [3]. Поглощение света при фотосинтезе осуществляется хлорофиллом и каротиноидами с максимумами поглощательной способности на длинах волн 700 и 680 нм.

Изменения, связанные со строением и процесформообразования растений, получили сами название фотоморфогенеза. При этих изменениях свет выступает не как первичный источник энергии, а как сигнальное средство, регулирующее процессы роста и развития растений. Поглощение света при этом осуществляется пигментом фитохромом, максимумы поглощения которого в длинноволновой области спектра соответствуют значениям 660 и 730 нм. При этом облучение светом с длиной волны 730 нм приостанавливает процессы развития растения [4]. На рис. 1 представлены спектры поглощения основных физикохимических процессов, протекающих в зеленом листе растения: кривая *l* – спектр поглощения при синтезе хлорофилла; кривая 2 - спектр поглощения при процессе фотосинтеза; кривая 3 – поглощение при фотоморфогенезе [5].



Рис. 1. Активность процессов фотосинтеза, фотоморфогенеза и синтеза хлорофилла

Fig. 1. Intensity of photosynthesis, photomorphogenesis and chlorophyll synthesis

Проведение эксперимента. В качестве источников излучения были выбраны красные (К) и дальнекрасные (ДК) СИД мощностью 3 Вт с длинами волн излучения 660 и 730 нм соответственно на основе гетероструктур AlGaInP. Светодиоды на основе данного соединения широко используются в агрофотонике для улучшения показателей роста растений [6]. Спектральные характеристики светодиодов, которые исследовались согласно методике, описанной в [7], приведены на рис. 2. Исследование проводилось при различных значениях тока накачки: 10, 30, 70, 180, 250, 300 и 350 мА. При увеличении тока накачки в приведенном диапазоне максимум спектральной характеристики увеличивался.

Также для исследования влияния излучения на рост томатов были выбраны широко используемые полноспектральные (П) (400...800 нм) люминофорные "фитосветодиоды" для растений, максимумы спектра излучения которых соответствуют длинам волн 440 и 660 нм (как это видно на измеренных спектральных харак-



Рис. 2. Спектральные характеристики: *a* – красного СИД; *б* – дальнего красного СИД *Fig.* 2. Spectral characteristics: *a* – red LED; *б* – far red LED



Рис. 3. Спектральные характеристики: а – полноспектрального СИД; б – синего СИД Fig. 3. Spectral characteristics: a -full spectrum LED; $\delta -$ blue LED

теристиках (рис. 3, a)), а также синие (С) СИД для облучения семян моркови (440 нм) (рис. 3, б). Исследование проводилось также при различных значениях тока накачки: 10, 30, 70, 180, 250, 300 и 350 мА. При увеличении тока накачки максимум спектральной характеристики увеличивался.

Так как максимальный ток выбранных светодиодов составляет 700 мА, и сильное снижение эффективности работы наблюдается уже при токе около 500 мА (результат нагрева активной области СИД [8]), для исследований был выбран рабочий ток установки 300 мА.

С учетом полученных спектральных характеристик значения плотности фотосинтетического фотонного потока для каждого СИД были вычислены по формуле

$$F_{\Phi AP} = \int_{400}^{700} \varphi_{\lambda} \frac{\lambda}{hcN_{A}S} d\lambda = \frac{K}{S} \int_{400}^{700} \varphi_{\lambda} \lambda \, d\lambda,$$

где F_{ФАР} – плотность фотосинтетического потока фотонов; ϕ_{λ} – спектральная плотность распределения мощности излучения прибора (в области ФАР); λ – длина волны; h – постоянная Планка; *с* – скорость света; *N*_A – постоянная Авогадро; S – площадь освещенной поверхности; К – коэффициент.

На графиках зависимости плотности фотосинтетического фотонного потока от тока накачки (рис. 4): красная кривая – значения для красного СИД; зеленая – для фитосветодиода; серая – ДК СИД; темно-синяя – для синего СИД. При выбранном рабочем токе значения плотности фотосинтетического фотонного потока составляют (рис. 4): для красного СИД – 90 мкмоль· c^{-1} · m^{-2} ; синего СИД – 81 мкмоль· c^{-1} · m^{-2} ; ДК СИД – 81 мкмоль·с⁻¹·м⁻²; П СИД – 98 мкмоль·с⁻¹·м⁻². Для обеспечения требуемого минимального PPFD для томатов, значение ко-185...200 мкмоль·с⁻¹·м⁻², торого составляет каждый бокс содержал по 2 СИД. Для моркови по 3 СИД на каждый экспериментальный бокс (значение PPFD ~ 250 мкмоль· c^{-1} · M^{-2}).

Для исследования влияния излучения на проращивание ростков томатов проводились эксперименты по облучению К СИД, сочетанием К и ДК и облучению П СИД. Соотношение потоков красного и дальнего красного света влияет на длину гипокотиля и формирование кроны рассады. При этом низкое соотношение К:ДК света в спектре (большая доля ДКизлучения) приводит к реакции синдрома избегания затенения, в результате которого у растения наблюдается усиленный рост [9]. Пигменты растений, у которых пик чувствительности находится в диапазоне красного излучения, отвечают за развитие корневой системы, созревание плодов и цветение растений. Так как экс-



Определение оптимального спектрального состава излучения светодиодной фитолампы для стимуляции развития семян моркови и томата **Optimal Spectral Radiation Composition of a LED Phytolapm for Stimulating Carrot and Tomato Seed Development**

перименты проводились в стадии проращивания и наиболее важный параметр для исследования – длина гипокотиля, было выбрано соотношение К и ДК – 1:1. Пигменты с чувствительностью в диапазоне синего излучения отвечают за стимулирование образования белков и регулирование скорости роста растений. Также важную роль эти пигменты играют в развитии листьев и росте растения [10].

Для исследования влияния излучения на проращивание ростков моркови были выбраны следующие сочетания СИД: 3 синих СИД; 3 красных СИД, 2 красных СИД и 1 синий; 2 синих СИД и 1 красный.

Семена томатов и моркови помещались в боксы размерами 6 × 8 см, источники излучения были расположены на расстоянии 10 см от растений. В качестве контрольной группы использовались семена, проращиваемые в соответствии с ГОСТ 12038–84, для которых поддерживались следующие условия: отсутствие освещенности; постоянная температура 20 °С; в качестве подложки для проращивания использовалась фильтровальная бумага. Длительность исследований – 10 дней [11].

Результаты и обсуждение. В процессе экспериментов по проращиванию семян томатов было выявлено: ростки у семян, проращиваемых при сочетании К и ДК СИД, появились на 2-3 дня позже, чем в других экспериментальных группах. По завершении этапа проращивания, который для томатов составляет 10 дней, ростки, пророщенные при сочетании К- и ДКсвета, показали самую низкую всхожесть (54 %). Это связано с "блокирующим" для развития действием дальнего красного света в соотношении 1:1 К- и ДК-потоков. Ростки из контрольной партии, проращиваемые в темноте, в результате показали высокий процент всхожести (91%), при этом имели малую площадь листа. Практически отсутствующий зеленый пигмент в ростках свидетельствует о низком уровне синтеза хлорофилла [12]. Средняя длина гипокотиля составила 42.5 мм, что примерно в 2.5 раза больше, чем у образцов, облучаемых красным светом (17.2 мм). Усиленный рост стебля свидетельствует о том, что растения подвергаются воздействию "синдрома избегания тени" [13].

Образцы, проращиваемые при досветке светодиодами 660 нм, показали наибольший процент всхожести среди всех образцов (94.7 %), усиленный рост гипокотиля (среднее значение – 17.2 мм) и корневой системы (среднее значение – 29.4 мм). Из-за нехватки синего излучения растения подвергаются влиянию скотоморфогенного развития, что также присуще росту без освещения.

Наличие "синей" части спектра в полноспектральных фитосветодиодах повлияло на усиленный синтез хлорофилла в образцах данной контрольной группы для томата, однако ростки имели истонченный стебель. Образцы показали наибольшую среднюю длину корней (33.1 мм).

Данные, полученные в работе, соответствуют ранее проведенным опытам. Среди красного диапазона наиболее благоприятными являются длины волн 625...680 нм, где происходит наибольший рост листьев и осевых органов для томатов. При недостатке красного излучения формируются неполноценные органы, что впоследствии приводит к низким урожаям. При облучении синим диапазоном спектра, который содержится в полноспектральных светодиодах, затормаживается рост стебля, корней и листа [14].

Наибольшая всхожесть ростков моркови наблюдалась при облучении СИД коротковолнового диапазона (79 %). Самое высокое среднее и максимальное значения длины стебля наблюдались в боксах с контрольными образцами, что, возможно, объясняется недостатком света и вытягиванием ростка за счет энергии, полученной из кислорода и воды. Стоит отметить, что наибольшее количество семядольных листьев наблюдалось для образцов, облучаемых сочетанием двух С СИД и одного К СИД.

Таким образом, наилучшие результаты всхожести и развития моркови были получены при облучении ростков светодиодами коротковолнового диапазона (значение PPFD – 243 мкмоль·с⁻¹·м⁻²).

Стоит отметить важную особенность: ростки томата, выращенные при сочетании К- и ДК-света, и ростки, пророщенные под фитосветодиодом, имели фиолетовый окрас стеблей и корней – в результате активации биосинтеза антоцианов. Эти пигментные вещества

синтезируются в растении в стрессовых условиях, однако данный факт еще не получил глубокого физиолого-биохимического обоснования. Таким образом, возможно, синий свет, входящий в спектр фитосветодиода, воспринимается растением как стрессовый фактор, такой же эффект оказывает излучение дальнего красного света с длиной волны 740 нм [15]. Результаты экспериментов по проращиванию томатов приведены в гистограммах на рис. 5 (синий – всхожесть, о. е.; оранжевый - среднее количество боковых корней, шт.) и на рис. 6 (синий – средняя длина ростка, мм; оранжевый - средняя длина корешка, мм). Результаты по проращиванию моркови представлены в гистограммах на рис. 7 (синий – всхожесть, %; оранжевый – средняя длина стебля, мм) и на рис. 8 (синий – средняя длина корня, мм; оранжевый – наличие зеленых листьев, %).

Выводы. Установлено, что использование досветки излучением полупроводниковых светодиодов в стадии проращивания ростков томатов и моркови может как положительно, так и отрицательно повлиять на рост и развитие ростков. Облучение светом СИД с максимумом спектральной характеристики на длине волны 660 нм увеличивает всхожесть ростков томата на 4 % по сравнению с образцами, выращенными согласно стандарту, и на 29 % по сравнению с образцами, проращенными под фитосветодиодами. Облучение фитосветодиодами увеличивает среднюю длину корней ростков











average root length, mm

Определение оптимального спектрального состава излучения светодиодной фитолампы для стимуляции развития семян моркови и томата Optimal Spectral Radiation Composition of a LED Phytolapm for Stimulating Carrot and Tomato Seed Development



Рис. 7. Результаты экспериментов по проращиванию моркови в гистограммах: синий – всхожесть, %; оранжевый – средняя длина стебля, мм

Fig. 7. Histograms presenting experimental results for carrot germination: blue – germination, %; orange – average stem length, mm





Fig. 8. Histograms presenting experimental results for carrot germination: blue – average root length, mm; orange – presence of green leaves, %

томатов на 11 % по сравнению с образцами, проросшими при облучении красным светом (660 нм), и на 12 % по сравнению с результатами проращивания при комбинации красного и ДК-света. Облучение красным (660 нм) и дальним красным (730 нм) светом в соотношении 1:1 ухудшило результаты всхожести семян томатов на 41 % по сравнению с контрольной партией.

Для усиления вегетативного развития ростков моркови подходит излучение комбинации двух синих и одного красного СИД (значение PPFD – 253 мкмоль·с⁻¹·м⁻²). Наилучшие результаты всхо-

жести и развития моркови были получены при облучении ростков светодиодами коротковолнового диапазона спектра (440 нм) (значение PPFD – 243 мкмоль·с⁻¹·м⁻²). Таким образом, при проектировании фитоламп для досветки семян томатов на этапе проращивания необходимо учесть, что растению требуется освещение 660 нм и плотность фотосинтетического потока фотонов 200 мкмоль·с⁻¹·м⁻², а для семян моркови – 250 мкмоль·с⁻¹·м⁻² при соотношении СИД с длинами волн 440 и 660 нм 2:1.

Авторский вклад

Губина Анастасия Анатольевна – проведение и обработка экспериментов по проращиванию томатов, анализ литературы.

Левин Евгений Витальевич – проведение и обработка экспериментов по проращиванию моркови, анализ литературы.

68	Определение оптимального спектрального состава излучения светодиодной фитолампы
	для стимуляции развития семян моркови и томата
	Optimal Spectral Radiation Composition of a LED Phytolapm for Stimulating
	Carrot and Tomato Seed Development

Романович Мария Михайловна – планирование, постановка, организация экспериментов, редактирование статьи.

Дегтерев Александр Эдуардович – измерение спектральных характеристик светодиодов, организация работы на спектрометре Ocean Optics USB4000.

Патоков Никита Олегович – редактирование статьи.

Ламкин Иван Анатольевич – руководство научной работой, планирование, организация экспериментов. Тарасов Сергей Анатольевич – постановка задачи и руководство научными исследованиями.

Author's contribution

Anastasia A. Gubina, conducting and processing experiments on the germination of tomatoes, analysis of the literature. Evgeniy V. Levin, conducting and processing experiments on the germination of carrots, analysis of the literature. Maria M. Romanovich, planning, staging, organization of experiments, editing the article.

Alexander E. Degterev, measurement of the spectral characteristics of LEDs, organization of work on the Ocean Optics USB4000 spectrometer.

Nikita O. Patokov – editing the article.

Ivan A. Lamkin, management of scientific work, planning, organization of experiments.

Sergey A. Tarasov, problem setting and scientific research management.

Список литературы

1. Spalding E. P., Folta K. M. Illuminating topics in plant photobiology // Plant, Cell and Environment. 2005. Vol. 28, № 1. P. 39–53. doi: 10.1111/j.1365-3040.2004.01282.x

2. О разработке светодиодного светильника для тепличных комбинатов / С. Д. Богатырев, Д. С. Степунин, А. П. Какуркин, В. Н. Сафрончев // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: сб. тр. конф., Саранск, Россия, 15–16 марта 2017. Саранск, 2017. С. 225–229.

3. Shinomura T., Uchida K., Furuya M. Elementary Processes of Photoperception by Phytochrome A for High-Irradiance Response of Hypocotyl Elongation in Arabidopsis // Plant Physiology. 2000. Vol. 122, № 1. P. 147–156. doi: 10.1104/pp.122.1.147

4. The Optoelectronic Semiconductor Device Based of the Leds to Improve Plant Growth / M. M. Romanovich, N. V. Roshina, A. A. Aleksandrova, S. A. Tarasov, I. A. Lamkin // IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St Petersburg, Moscow, Russia, 27–30 Jan. 2020. IEEE, 2020. P. 1123–1125. doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039256

5. The efficiency of UV LEDs based on GaN/AlGaN heterostructures / A. S. Evseenkov, S. A. Tarasov, I. A. Lamkin, A. V. Solomonov, S. Y. Kurin // Proc. of the IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf., St Petersburg, Russia, 02–04 Feb. 2015. IEEE, 2015. P. 27–29. doi: 10.1109/EIConRusNW.2015.7102224

6. Study of the characteristics of UVA LEDs grown by HVPE: active region thickness-dependent performance / E. A. Menkovich, S. A. Tarasov, I. A. Lamkin, A. V. Solomonov, S. Yu. Kurin, A. A. Antipov, I. S. Barash, A. D. Roenkov, Yu. N. Makarov, A. S. Usikov, H. I. Helava // J. of Physics: Conf. Series. 2014. Vol. 541, № 1. P. 012054. 7. Ракутько Е. Н., Ракутько С. А. Выращивание рассады томата под излучением светодиодов с различным соотношением красного и дальнекрасного потоков // Изв. СПбГАУ. 2016. № 44. С. 281–287.

8. Влияние искусственного света на рост томатов / С. Н. Александрова, Ж. Д. Кудайбергенова, А. А. Рыбакова, Е. Г. Незнамова // Наука и современность. 2014. № 29. С. 141–144.

9. Oh S. I., Lee J. H., Lee A. K. Growth, antioxidant concentrations and activity in Sedum takesimense as affected by supplemental LED irradiation with light quality // Horticultural Science and Technology. 2019. Vol. 37, N_{\odot} 5. P. 589–597.

10. LEDs for photons, physiology and food / P. M. Pattison, J. Y. Tsao, G. C. Brainard, B. Bugbee // Nature. 2018. Vol. 563. P. 493–500. doi: 10.1038/s41586-018-0706-x

11. Significant reduction in energy for plant-growth lighting in space using targeted LED lighting and spectral manipulation / L. Poulet, G. D. Massa, R. C. Morrow, C. M. Bourget, R. M. Wheeler, C. A. Mitchell // Life Science in Space Research. 2014. Vol. 2. P. 43–53. doi: 10.1016/j.lssr.2014.06.002

12. Hernández R., Kubota C. Physiological, morphological, and energy-use efficiency comparisons of LED and HPS supplemental lighting for cucumber transplant production // HortScience. 2015. Vol. 50, N_{\odot} 3. P. 351–357.

13. Folta K. M., Maruhnich S. A. Green light: a signal to slow down or stop // J. of Experimental Botany. 2007. Vol. 58, № 12. P. 3099–3111. doi: 10.1093/jxb/erm130

14. Leaf shape index, growth, and phytochemicals in two leaf lettuce cultivars grown under monochromatic light emitting diodes / K.-H. Son, J.-H. Park, D. Kim, M.-M. Oh // Korean J. of Horticultural Science and Technology. 2012. Vol. 30, № 6. P. 664–672. doi: 10.7235/hort.2012.12063

15. Wang Y., Folta K. M. Contributions of green

Определение оптимального спектрального состава излучения светодиодной фитолампы 69 для стимуляции развития семян моркови и томата Optimal Spectral Radiation Composition of a LED Phytolapm for Stimulating Carrot and Tomato Seed Development

light to plant growth and development // Americal J. of 10.3732/ajb.1200354 Botany. 2013. Vol. 100, № 1. P. 70–78. doi:

Информация об авторах

Губина Анастасия Анатольевна – бакалавр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2020), студент магистратуры 2-го года обучения Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; агрофотоника.

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

E-mail: gubina.anastasia2010@yandex.ru

Левин Евгений Витальевич – бакалавр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2020), студент магистратуры 1-го года обучения Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – фотоника; спектральный анализ; светодиоды; агрофотоника.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия E-mail: zhenya081099@gmail.com

Романович Мария Михайловна – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2019), аспирант 2-го года обучения Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 12 научных работ. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; агрофотоника.

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

Дегтерев Александр Эдуардович – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2020), аспирант 2-го года обучения Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 16 научных публикаций. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика.

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

Патоков Никита Олегович – исследователь, преподаватель-исследователь по направлению "Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии" (2021) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов: электроника; микроэлектроника; фотоника.

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

Ламкин Иван Анатольевич – кандидат технических наук (2015), доцент кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 80 научных работ. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия E-mail: ialamkin@etu.ru

Тарасов Сергей Анатольевич – доктор технических наук (2016), заведующий кафедрой фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 160 научных работ. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика.

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

References

1. Spalding E. P., Folta K. M. Illuminating Topics in Plant Photobiology. Plant, Cell and Environment. 2005, vol. 28, no. 1, pp. 39–53. doi: 10.1111/j.1365-3040.2004.01282.x

70

2. Bogatyrev S. D., Stepunin D. S., Kakurkin A. P., Safronchev V. N. O razrabotke svetodiodnogo svetil'nika dlya teplichnykh kombinatov [On the Development of an LED Lamp For Greenhouse Plants]. Problemy i perspektivy razvitiya otechestvennoi svetotekhniki, elektrotekhniki i energetiki [Problems and Prospects for the Development of Domestic Lighting, Electrical Engineering and Energy], Saransk, Russia, 15-16 March 2017, pp. 225–229. (In Russ.)

3. Shinomura T., Uchida K., Furuya M. Elementary Processes of Photoperception by Phytochrome A for High-Irradiance Response of Hypocotyl Elongation in Arabidopsis. Plant Physiology. 2000, vol. 122, no. 1, pp. 147-156. doi: 10.1104/pp.122.1.147

4. Romanovich M. M., Roshina N. V., Aleksandrova A. A., Tarasov S. A., Lamkin I. A. The Optoelectronic Semiconductor Device Based of the Leds to Improve Plant Growth. IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St Petersburg, Moscow, Russia, 27-30 Jan. 2020. IEEE, 2020, pp. 1123-1125. doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039256.

5. Evseenkov A. S., Tarasov S. A., Lamkin I. A., Solomonov A. V., Kurin S. Y. The Efficiency of UV LEDs Based on GaN/AlGaN Heterostructures. Proc. of the IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf., St Petersburg, Russia, 02-04 Feb. 2015. IEEE, 2015, pp. 27-29. doi: 10.1109/EIConRusNW.2015.7102224

6. Menkovich E. A., Tarasov S. A., Lamkin I. A., Solomonov A. V., Kurin S. Yu., Antipov A. A., Barash I. S., Roenkov A. D., Makarov Yu. N., Usikov A. S., Helava H. I. Study of the Characteristics of UVA LEDs Grown by HVPE: Active Region Thickness-Dependent Performance. J. of Physics: Conf. Series. 2014, vol. 541, no. 1, p. 012054.

7. Rakutko E. N., Rakutko S. A. Growing Tomato Seedlings under the Radiation of LEDs with Different Ratios of Red and Far-Red Fluxes. Izv. SPbGAU. 2016, no. 44, pp. 281–287. (In Russ.)

8. Aleksandrova S. N., Kudaibergenova Zh. D., Rybakova A. A., Neznamova E. G. Influence of Artificial Light on the Growth of Tomatoes. Nauka i sovremennost' [Science and Modernity]. 2014, no. 29, pp. 141–144. (In Russ.)

9. Oh S. I., Lee J. H., Lee A. K. Growth, Antioxidant Concentrations and Activity in Sedum Takesimense as Affected by Supplemental LED Irradiation with Light Quality. Horticultural Science Technology. 2019, vol. 37, no. 5, pp. 589-597.

10. Pattison P. M., Tsao J. Y., Brainard G. C., Bugbee B. LEDs for Photons, Physiology and Food Research Perspective. Nature. 2018, vol. 563, pp. 493-500. doi: 10.1038/s41586-018-0706-x

11. Poulet L., Massa G. D., Morrow R. C., Bourget C. M., Wheeler R. M., Mitchell C. A. Significant Reduction in Energy for Plant-Growth Lighting in Space Using Targeted LED Lighting and Spectral Manipulation. Life Science in Space Research. 2014, vol. 2, pp. 43-53. doi: 10.1016/j.lssr.2014.06.002

12. Hernández R., Kubota C. Physiological, Morphological, and Energy-Use Efficiency Comparisons of LED and HPS Supplemental Lighting for Cucumber Transplant Production. HortScience. 2015, vol. 50, no. 3, pp. 351–357.

13. Folta K. M., Maruhnich S. A. Green Light: A Signal to Slow Down or Stop. J. of Experimental Botany. 2007, vol. 58, no. 12, pp. 3099-3111. doi: 10.1093/ jxb/erm130

14. Son K.-H., Park J.-H., Kim D., Oh M.-M. Leaf Shape Index, Growth, and Phytochemicals in Two Leaf Lettuce Cultivars Grown Under Monochromatic Light Emitting Diodes. Korean J. of Horticultural Science and Technology. 2012, vol. 30, no. 6, pp. 664-672. doi: 10.7235/hort.2012.12063

15. Wang Y., Folta K. M. Contributions of Green Light to Plant Growth and Development. Americal J. of Botany. 2013, vol. 100, no. 1, pp. 70-78. doi: 10.3732/ajb.1200354

Information about the authors

Anastasia A. Gubina, Bachelor in "Electronics and Nanoelectronics" (2020), 2-year Master's student of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 3 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; agrophotonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: gubina.anastasia2010@yandex.ru

Evgeniy V. Levin, Bachelor in "Electronics and Nanoelectronics" (2020), 1st year Master's student of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 2 scientific publications. Area of expertise: photonics; spectral analysis; LEDs; agrophotonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: zhenya081099@gmail.com

Maria M. Romanovich, Master in "Electronics and Nanoelectronics" (2020), 2nd year Postgraduate Student of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 12 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; agrophotonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: mmromanovich@etu.ru

Alexander E. Degterev, Master in "Electronics and Nanoelectronics" (2020), 2nd year Postgraduate Student of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 16 scientific publications. Area of expertise: electronics;

Определение оптимального спектрального состава излучения светодиодной фитолампы для стимуляции развития семян моркови и томата Optimal Spectral Radiation Composition of a LED Phytolapm for Stimulating

Carrot and Tomato Seed Development

photonics; solar energy.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: aedegterev@etu.ru

Nikita O. Patokov – Researcher, teacher-researcher in the field of "Photonics, instrumentation, optical and biotechnical systems and technologies" (2021) Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 2 scientific publications. Area of expertise: electronics; microelectronics; photonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: patocov@mail.ru

Ivan A. Lamkin, Cand. Sci. (Eng.) (2015), Associate Professor at the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 80 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; solar energy.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: ialamkin@etu.ru

Sergey A. Tarasov, Dr Sci. (Eng.) (2019), Head of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 160 scientific publications. Area of expertise: interests: electronics; photonics; solar energy.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: satarasov@etu.ru
Фотоника УДК 621.389 https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-3-73-85

Оригинальная статья

Использование фотовольтаических элементов для автономного энергообеспечения приборов радиоэлектроники на примере Wi-Fi-роутера

И. А. Ламкин, А. Э. Дегтерев[⊠], И. И. Михайлов, М. М. Романович, Н. О. Патоков, С. А. Тарасов

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

⊠ aedegterev@etu.ru

Аннотация

Введение. На сегодняшний день стремительно ухудшающееся состояние экологии требует инновационных решений для обеспечения электрической энергией различных устройств и систем. В связи с этим происходит постепенный переход на возобновляемые источники энергии, разновидностью которых является солнечная энергия. В данной статье описан Wi-Fi-роутер с питанием от современных фотоэлектрических преобразователей.

Цель работы. Разработка Wi-Fi-роутера с питанием от современных фотоэлектрических преобразователей. **Материалы и методы.** Система была разработана на основе Wi-Fi-роутера YF360-H и фотовольтаического элемента HVL-105/O.

Результаты. Приведен расчет фотоэлектрической системы. Исследованы вольт-амперные и ватт-амперные характеристики солнечной панели. Разработана схема питания от солнечной панели. Эффективность преобразования на рабочем участке составила 90 %. Определена емкость внешнего аккумулятора для автономной работы системы в течение 7 дней. Моделирование в среде MatLab продемонстрировало высокую эффективность разработанной системы.

Заключение. Расчет фактически генерируемой фотоэлектрической системой энергии показал, что фотовольтаический элемент HVL-105/О может применяться для питания Wi-Fi-роутера YF360-H при самых неблагоприятных для солнечных элементов погодных условиях.

Ключевые слова: фотовольтаическая ячейка, Wi-Fi-роутер, солнечный элемент, инсоляция

Для цитирования: Использование фотовольтаических элементов для автономного энергообеспечения приборов радиоэлектроники на примере Wi-Fi-роутера / И. А. Ламкин, А. Э. Дегтерев, И. И. Михайлов, М. М. Романович, Н. О. Патоков, С. А. Тарасов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 3. С. 73–85. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-73-85

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование проводилось в рамках проекта № FSEE-2020-0008, который выполнялся в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-01024-21-00.

Статья поступила в редакцию 19.04.2022; принята к публикации после рецензирования 23.05.2022; опубликована онлайн 28.06.2022



Photonics

Original article

The Use of Photovoltaic Cells for Autonomous Power Supply of Radio Electronic Devices on the Example of a Wi-Fi Router

Ivan A. Lamkin, Alexander E. Degterev, Ivan I. Mikhailov, Maria M. Romanovich, Nikita O. Patokov, Sergey A. Tarasov ⊠

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

⊠ aedegterev@etu.ru

Abstract

Introduction. In view of growing environmental concerns, innovative solutions to ensure electrical energy supply to various devices and systems are required. As a result, renewable energy sources, including those based on solar energy, are attracting much attention. In this context, the development of a Wi-Fi router powered by modern photovoltaic converters seems to be a relevant research task.

Aim. Development of a Wi-Fi router powered by modern photovoltaic converters.

Materials and methods. The proposed system was developed on the basis of a Wi-Fi router YF360-H and a photo-voltaic cell HVL-105/O.

Results. Calculations of the developed photovoltaic system were performed; volt-ampere and watt-ampere characteristics of the solar panel were investigated. The solar panel power supply circuit was developed, with the conversion efficiency in the working area achieving 90 %. The capacity of the external battery ensuring the system's autonomous operation for 7 days was determined. A modeling experiment in the MATLAB environment demonstrated the high efficiency of the developed system.

Conclusion. According to the conducted calculations, a HVL-105/O photovoltaic cell can be used to power a Wi-Fi router YF360-H under the weather conditions considered most unfavorable for solar cells.

Keywords: photovoltaic cell, Wi-Fi router, solar panel, insolation

For citation: Lamkin I. A., Degterev A. E., Mikhailov I. I., Romanovich M. M., Patokov N. O., Tarasov S. A. The Use of Photovoltaic Cells for Autonomous Power Supply of Radio Electronic Devices on the Example of a Wi-Fi Router. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 73–85. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-73-85

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

Source of financing. The study was carried out within the framework of project no. FSEE-2020-0008, which was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation no. 075-01024-21-00.

.....

Submitted 19.04.2022; accepted 23.05.2022; published online 28.06.2022

Введение. На сегодняшний день солнечная энергия – это перспективное направление развития альтернативной энергетики. Энергия солнца уже широко применяется для обеспечения электричеством зданий, летательных аппаратов, бытовых устройств и т. п. Описанная в статье система предназначена для обеспечения интернет-связью зданий, улиц, зон отдыха, парков, сельской местности и труднодоступных мест, где отсутствуют другие источники электрической энергии. На фоне мировой тенденции перехода на возобновляемые источники энергии система имеет большой потенциал для применения как в некоммерческих целях, так и для обеспечения "экологичным интернетом" офисов и предприятий.

Исследование. Расчет фотоэлектрической системы. Объединение Wi-Fi-роутера с солнечной панелью (СП) позволяет обеспечить интернет-соединением как улицы, где уже широко распространены разные устройства с питанием от СП, так и здания. Аналогично можно обеспечить интернет-соединение при отсутствии других потенциальных источников энергии. На рис. 1 представлена схема фотовольтаической системы. Важными условиями для расчета фотоэлектрической системы являются: определение общего тока нагрузки и времени



Рис. 1. Схематичное изображение фотовольтаической системы

Fig. 1. Schematic representation of a photovoltaic system

работы; определение потерь; расчет солнечной инсоляции; требования к фотовольтаическим ячейкам (ФВЯ); расчет емкости аккумуляторов; выбор подходящего МРРТ (Maximum Power Point Tracking)-контроллера.

Проведем расчет фотоэлектрической системы для рассматриваемого роутера YF360-H. Прежде, чем перейти к определению тока нагрузки, необходимо выбрать рабочее напряжение фотовольтаического элемента. Чаще всего встречаются значения в 12, 24 и 48 В. Следующим шагом после определения напряжения является определение необходимой энергии в виде произведения тока и среднего времени функционирования, измеряемого в ампер-часах. В случае потребления нагрузкой постоянного тока необходимая суточная энергия (в ватт-часах) определяется произведением номинальной мощности и времени функционирования за сутки [1, 2].

Фотоэлектрическая система должна обеспечивать стабильную работу Wi-Fi-роутера в течение рабочего дня. Номинальное напряжение СП составляет 48 В. Мощность устройства

$$W = IU = 1.5 \cdot 24 = 36$$
 BT,

где *I* – сила тока; *U* – напряжение.

За 15 ч потребляемая мощность

$$W_h = Wt = 36 \cdot 15 = 540 \text{ Bt} \cdot \text{y},$$

где *t* – время.

Необходимая за 15 ч энергия

$$A_h = \frac{W_h}{U} = \frac{540 \text{ BT} \cdot \text{y}}{48 \text{ B}} = 11.25 \text{ A} \cdot \text{y},$$

где A_h – запасаемая энергия.

Некоторые компоненты фотоэлектрической системы, такие, как аккумуляторы, регуляторы заряда, для своего функционирования также потребляют энергию. Потребленная самой системой энергия считается энергетической потерей системы. Для учета таких потерь в системе следует к уже рассчитанной энергии прибавить 20...30 % от нее:

$$A_h = A_h \cdot 1.2 = 11.25 \cdot 1.2 = 13.5 \text{ A} \cdot \text{y}$$

На количество сгенерированной ФВЯ энергии влияет множество факторов, таких, как погодные условия, время года, инсоляция. Солнечный элемент должен быть установлен под оптимальным углом для получения максимальной производительности [3].

Среднегодовая солнечная инсоляция на горизонтальную поверхность в Санкт-Петербурге составляет 930 кВт·ч/м², а при усредненном оптимальном угле наклона – 1243 кВт·ч/м² [5]. Количество солнечных часов при этом составляет h = 1243/365 = 3.4 ч. Сгенерированный ток определяется отношением полной энергии к количеству солнечных часов за сутки. Таким образом:

$$I = \frac{A_h}{h} = \frac{13.5 \,\mathrm{A} \cdot \mathrm{y}}{3.4 \,\mathrm{y}} = 3.8 \,\mathrm{A},$$

где *h* – количество солнечных часов.

Производители фотоэлектрических модулей выпускают устройства с разной выходной мощностью. При оптимальных условиях требуемый ток, который был рассчитан выше, можно получить с помощью минимального количества модулей. Модули могут быть соединены как последовательно, так и параллельно. При последовательном соединении увеличивается номинальное напряжение, а при параллельном – ток.

Требуемое количество модулей, включенных параллельно, определяется отношением полного тока нагрузки (с учетом потерь) и тока в рабочей точке максимальной мощности. Количество модулей при последовательном соединении определяется отношением номи-

нального напряжения устройства и напряжения в рабочей точке. Число модулей равно произведению количества модулей при параллельном и последовательном соединениях.

Для получения требуемой энергии 540 Вт.ч используется солнечный модуль HVL-105/О с номинальной мощностью 105 Вт. Это тонкопленочные, микроморфные, инновационные фотовольтаические элементы, представляющие собой гетероструктуру, в которой на слой аморфного кремния наносится тонкий слой кристаллического кремния толщиной 25 нм. Данные ФВЯ способны преобразовывать не только видимой свет, но и инфракрасный. Преимуществами данных фотовольтаических элементов также являются:

– значительное снижение цены (15...20 %)
 из-за дешевой технологии производства;

 низкая скорость деградации. Через 10 лет
 эффективность снижается не более чем на
 10 %, а за 25 лет – 25 %. Это вызвано уменьшением толщины слоя аморфного кремния;

 минимальное падение производительности при высоких температурах;

– при низкой инсоляции данные ФВЯ обеспечивают большую эффективность, чем фотовольтаические элементы из кристаллического кремния. Данная особенность являлась ключевой при выборе ФВЯ, так как в Санкт-Петербурге бывает всего от 31 до 62 солнечных дней. Количество требуемых модулей в параллельном соединении:

$$\frac{I}{I_{\rm mpp}} = \frac{3.8\,\mathrm{A}}{2.06\,\mathrm{A}} = 1.87 > 1,$$

где I_{mpp} – ток в точке максимальной мощности.

Номинальное напряжение устройства составляет 24 В, следовательно, количество модулей в последовательном соединении:

$$\frac{U}{U_{\rm mpp}} = \frac{24\,{\rm B}}{51\,{\rm B}} = 0.47 < 1,$$

где $U_{\rm mpp}$ – напряжение в точке максимальной мошности.

Другими словами, для питания роутера необходимо 2 модуля HVL-105/О, включенных параллельно. Для получения максимальной эффективности надо разместить фотовольтаический элемент под соответствующим углом. Как правило, этот угол близок к значению угла широты, на которой находится ФВЯ. Значения инсоляции *H* под оптимальными углами приведены в таблице и наглядно продемонстрированы на рис. 2. Для определения "наклонной" инсоляции применяется формула

$$H_i = H_i / \cos \theta, \tag{1}$$

где H_j – "наклонная" инсоляция, кВт · ч/(м² · год); H_i – инсоляция на горизонтально располо-

Уровень инсоляции в течение года и оптимальный угол наклона солнечного элемента [4]

Месяц	Количество дней	Оптимальный угол наклона,°	Дневная сумма солнечной инсоляции, кВт·ч/м ²	Месячная сумма солнечной инсоляции кВт·ч/м ²	
Январь	31	76	1.13	35.03	
Февраль	28	67	2.31	64.68	
Март	31	54	3.5	108.5	
Апрель	30	38	4.57	137.1	
Май	31	23	5.52	171.12	
Июнь	30	14	5.76	172.8	
Июль	31	16	5.51	170.81	
Август	31	30	4.67	144.77	
Сентябрь	30	48	3.34	100.2	
Октябрь	31	62	2.16	66.96	
Ноябрь	30	74	1.46	43.8	
Декабрь	31	79	0.87	26.97	
Среднее	_	48.3	3.4	103.56	
Сумма	_	_	_	1242.74	

Yearly variations in the insolation level and optimal angles of the solar cell inclination [4]

Использование фотовольтаических элементов для автономного энергообеспечения приборов радиоэлектроники на примере Wi-Fi-роутера The Use of Photovoltaic Cells for Autonomous Power Supply of Radio Electronic Devices on the Example of a Wi-Fi Router



Рис. 2. Изменение уровня инсоляции в Санкт-Петербурге в течение года

Fig. 2. Yearly variations in the level of insolation in St Petersburg

женном ΦВЯ, кВт·ч/(м²·год); θ – широта. Фактически сгенерированная фотоэлектрической системой энергия рассчитывается по формуле

$$W = W_u H_g H_j,$$

где W_u – номинальная мощность; H_g – эффективность системы. Номинальная мощность одной панели HVL-105/О составляет 105 Вт. Эффективность системы обычно составляет примерно 70 % (потери на конверторе – 8 %; потери на загрязнении поверхности – 7 %; температурные потери – 15 %). Наклонная иррадиация равна 1243 кВт·ч/(м²·год) (см. таблицу).

Тогда

$$W = (2I_{mpp})U_{mpp}H_g H_j =$$

= (2 \cdot 2.06) \cdot 51 \cdot 0.7 \cdot 1243 = 183 \kappa Br \cdot 4.

Итак, при установке фотовольтаического элемента с номинальной мощностью 105 Вт в условиях Санкт-Петербурга сгенерированная мощность составит 183кВт · ч/год. Учитывая наличие аккумулятора, можно утверждать, что система способна обеспечить питание роутера в декабре, когда наблюдается наименьший уровень инсоляции.

Важным компонентом фотоэлектрической системы являются аккумуляторы, которые обеспечивают функционирование подключенных устройств в ночное время или при низкой инсоляции. Период, при котором питание нагрузки не зависит от сгенерированного модулем тока, называется периодом автономной работы. Этот период зависит от типа нагрузки



Рис. 3. Схема понижающего преобразователя *Fig. 3.* Buck converter circuit

и погодных условий и может составлять сутки и более [6].

Емкость аккумулятора равна произведению дневной потребляемой энергии (включая потери) и количества дней автономной работы:

$$A_{\text{bat}} = A_h t = 13.5 \cdot 7 = 94.5 \,\text{A} \cdot \text{ч}.$$

Чтобы продлить срок эксплуатации аккумуляторов, рекомендуется использовать 80 % от его емкости. Требуемая мощность при этом составит

$$A_{\text{bat}} = \frac{94.5 \,\text{A} \cdot \text{y}}{0.8} = 118 \,\text{A} \cdot \text{y}.$$

Для осуществления заряда аккумуляторов используются специальные МРРТконтроллеры. Типичная схема понижающего преобразователя представлена на рис. 3. Он состоит из катушки, диода, ключа, выходного и входного конденсаторов.

Данная схема предназначена для уменьшения потерь при преобразовании напряжения. Преобразование происходит посредством передачи порций энергии в нагрузку. Вместо ключа часто применяется либо MOSFET-, либо IGBT-транзистор, переключениями которого и обусловлена передача энергии. Частота переключения задается контроллером, подключенным к затвору.

Схема имеет 2 режима работы: при замкнутом ключе и при разомкнутом ключе. Когда ключ замкнут, в преобразователь и нагрузку передается энергия от источника питания. Она сразу начинает запасаться катушкой (конденсатор подпитывает нагрузку), а позднее, когда ток через катушку превысит выходной ток, передаваемая энергия начинает запасаться и конденсатором. Напряжение на катоде диода

Использование фотовольтаических элементов для автономного энергообеспечения приборов радиоэлектроники на примере Wi-Fi-poyrepa The Use of Photovoltaic Cells for Autonomous Power Supply of Radio Electronic Devices on the Example of a Wi-Fi Router





при этом равно напряжению питания, соответственно падение на катушке постоянно и равно:

$$U_{L(BK\Pi)} = U_{BX} - U_{BHX};$$
$$I_{C(BK\Pi)} = I_L - I_{BHX},$$

где $U_{L(BKЛ)}$ – падение напряжения на катушке при замкнутом ключе; U_{BX} – входное напряжение; U_{BbIX} – выходное напряжение; $I_{C(BKЛ)}$ – сила тока на катушке при замкнутом ключе; I_L – ток, проходящий через катушку; I_{BbIX} – выходной ток.

Диод в это время закрыт, поскольку напряжение на катоде больше, чем на аноде [7, 8].

На рис. 4 изображены графики входных и выходных токов и напряжений. Когда ключ разомкнут, энергия от источника питания в нагрузку и преобразователь не передается. При этом сначала начинает расходоваться энергия, запасенная в катушке (и на нагрузку, и на продолжение заряда конденсатора), а потом, когда ток через катушку становится меньше выходного тока, конденсатор тоже начинает отдавать запасенную энергию [9]. При этом:

$$\begin{split} U_{L(\text{BDIKJ})} + U_{\text{BDIX}} &= 0; \\ U_{L(\text{BDIKJ})} &= -U_{\text{BDIX}}; \\ I_{C(\text{BDIKJ})} &= I_L - I_{\text{BDIX}}, \end{split}$$

где $U_{L(выкл)}$ – падение напряжения на катушке при разомкнутом ключе; $I_{C(выкл)}$ – сила тока на катушке при разомкнутом ключе.

78

Следовательно:

$$\begin{split} U_{L(\text{BKI})}T_{\text{BKI}} + U_{L(\text{BBIKI})}T_{\text{BBIKI}} &= 0 ; \\ & \left(U_{\text{BX}} - U_{\text{BBIX}}\right)DT + \left(-U_{\text{BBIX}}\right)(1-D)T &= 0; \\ & U_{\text{BBIX}} &= DU_{\text{BX}}, \end{split}$$

где $T_{\rm BKЛ}$ — время включенного состояния; $T_{\rm BЫКЛ}$ — время выключенного состояния; D — скважность; T — период;

$$D = \frac{T_{\rm BKI}}{T} \Longrightarrow T_{\rm BKI} \equiv DT;$$

$$U_{\rm BX} = 51 \text{ B}; U_{\rm BbIX} = 24 \text{ B}; W_{\rm max} = 105.06 \text{ BT};$$

$$f_{\rm SW} = 5000 \,\Gamma \text{m}; \, \Delta I_L = 20 \,\%; \, \Delta U_C = 2\%;$$

$$r = 16 \text{ Om}.$$

Здесь $W_{\rm max}$ – максимальная мощность; $f_{\rm sw}$ – частота переключения; ΔI_L – амплитуда пульсаций тока; ΔU_C – амплитуда пульсаций напряжения; r – сопротивление.

Определение скважности:

$$D = \frac{U_{\rm BX}}{U_{\rm BMX}} = \frac{51}{24} = 0.471.$$

Определение тока через катушку:

$$I_L = \frac{U_{\text{Bbix}}}{r} = 1.5 \,\text{A}.$$

Определение амплитуды пульсаций тока на катушке:

$$\Delta I_L = 0.2 \cdot 1.5 = 0.3 \, \text{A}.$$

Определение индуктивности катушки:

$$L = \frac{U_{\rm BX} (1-D)D}{\Delta i_L f_{\rm SW}^2} = 8.47 \cdot 10^{-3} \, \Gamma {\rm H}.$$

Определение амплитуды пульсаций напряжения на конденсаторе (2 % от $U_{\text{вых}}$):

$$\Delta U_C = 0.02 \cdot 24 = 0.48.$$

Определение емкости конденсатора:

$$C = \frac{U_{\rm BX} (1-D)D}{8L\Delta U_C f_{\rm SW}^2} = 1.563 \cdot 10^{-5} \, \Phi.$$

Отслеживание точки максимальной мощности. На вольт-амперной характеристике ФВЯ существует точка с координатами

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 3. С. 73–85 Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 73–85





 $(U_{\rm mpp}, I_{\rm mpp})$, в которой ее выходная мощность максимальна. В связи с этим для достижения максимальной эффективности необходимо использование устройств для слежения за точкой максимальной мощности. Отслеживание максимальной мощности происходит с помощью так называемых МРРТ-контроллеров. На сегодняшний день на рынке представлено большое количество таких устройств. Оптимальным вариантом является Wincong sl03-4830a – современный контроллер для солнечных фотоэлектрических систем с встроенным жидкокристаллическим табло, обладающий рядом важных функций. Высокая надежность, качество исполнения и приемлемая цена делают его вполне подходящим вариантом. Преимуществами данной системы являются:

 поддержка максимальной выходной мощности без ее снижения при температуре окружающей среды до 50 °C;

 встроенный алгоритм контроля энергии в аккумуляторе отслеживает отдаваемую и потребляемую энергию, на основе чего рассчитывается оставшаяся в аккумуляторе энергия. Осуществляется с помощью интеллектуального контроллера солнечного заряда SL03;

 точная зарядка аккумуляторов напряжением 36 В/48 В/60 В с простой настройкой параметров.

Существует большое количество алгоритмов, которые могут лежать в основе МРРТ-контроллера (метод постоянного напряжения; метод холостого хода; метод короткого замыкания; алгоритм возмущения и наблюдения; алгоритм возрастающей проводимости). В данной статье рассматривается метод возмущения и наблюдения (Р&O). Принцип работы алгоритма возмущения и наблюдения представлен на рис. 5. Данный метод предполагает увеличение или уменьшение опорного напряжения $\Delta U_{\rm ref}$ фотоэлектрической си-

стемы с целью возмущения системы через равные промежутки времени и дальнейшее сравнение выходной мощности солнечного модуля на k-м и (k-1)-м этапах работы [3].

Если при изменении выходного напряжения солнечного модуля на *k*-м интервале измерения его мощность возрастает (переходы $A_2 \rightarrow A_1$, $B_2 \rightarrow B_1$ на рис. 5), то система управления продолжает перемещать рабочую точку солнечного модуля в этом направлении; в противном случае знак приращения опорного напряжения ΔU_{ref} изменяется, и рабочая точка солнечного модуля перемещается в противоположном направлении. Кривые 1 и 2 на рис. 5 соответствуют различным уровням инсоляции и отображают отклонение от правильного поиска точки максимальной мощности. О1 является точкой максимальной мощности на кривой І. При увеличении опорного напряжения точка О1 сместится в рабочую точку В. При увеличении освещенности (кривая 2) новой рабочей точкой окажется точка С. В таком случае приращение мощности принимается алгоритмом в виде результата возмущения. Направление приращения сохраняется, что приводит к образованию более отдаленной от истинной точки максимальной мощности О2 точки D. На рис. 6 представлена блок-схема алгоритма возмущения и наблюдения. На каждом следующем этапе возмущения алгоритм продолжает работать таким же образом, как описано ранее. Основным преимуществом такого подхода является простота реализации алгоритма [10–13].

Результаты моделирования. Для моделирования фотоэлектрической системы использовалась среда MatLab [14, 15]. Система состоит из СП, преобразователя с понижением напряжения, устройства отслеживания точки максимальной мощности, аккумулятора. Также представлена

Использование фотовольтаических элементов для автономного энергообеспечения
приборов радиоэлектроники на примере Wi-Fi-роутера
The Use of Photovoltaic Cells for Autonomous Power Supply of Radio Electronic Devices
on the Example of a Wi-Fi Router



Puc. 6. Блок-схема алгоритма возмущения и наблюдения [13] *Fig. 6.* Block diagram of the perturbation and observation algorithm

схема для определения эффективности преобразования энергии. Смоделировано действие типичной для Санкт-Петербурга солнечной инсоляции, установлена температура в 25 °С. Для моделирования СП был выбран модуль "PV array", изображенный на рис. 7, где выбраны параметры для соответствующей панели.

Модуль "PV array" имеет 2 входа для температуры и инсоляции и 3 выхода: измерение, положительный и отрицательный потенциалы. С помощью команды "Plot" в окне модуля "PV array" были получены вольтамперные и ватт-амперные характеристики СП HVL-105/О при уровнях инсоляции 1000, 500 и 100 Вт/м² (рис. 8).

Также были получены температурные зависимости СП при 45, 25 и 10 °С при неизменной инсоляции в 1000 Вт/м² (рис. 9).

Далее рассчитаем коэффициент заполнения для данной СП:

$$FF = \frac{U_{\rm mpp}I_{\rm mpp}}{U_{\rm oc}I_{\rm sc}} = \frac{2.06 \cdot 51}{2.6 \cdot 70} = \frac{105.06}{182} = 58 \%,$$

где FF – коэффициент заполнения; $U_{\rm mpp}$ – напряжение в точке максимальной мощности; $I_{\rm mpp}$ – ток в точке максимальной мощности;



Рис. 7. Введенные параметры солнечного элемента

Fig. 7. Entered parameters of the solar cell



Fig. 8. Volt-ampere and watt-ampere characteristics of HVL-105/O







 $U_{\rm oc}$ – напряжение холостого хода; $I_{\rm sc}$ – ток короткого замыкания.

График изменения уровня инсоляции представлен на рис. 10. Он был получен с помощью модуля "Signal builder". Из-за долгого времени компиляции инсоляция за весь день представлена в четырех секундах, что оказалось достаточным для демонстрации работоспособности системы.

Для моделирования отслеживания точки максимальной мощности (TMM) был выбран модуль "MatLab function". С его помощью можно использовать код MatLab в среде моделиро-

Использование фотовольтаических элементов для автономного энергообеспечения приборов радиоэлектроники на примере Wi-Fi-poyrepa The Use of Photovoltaic Cells for Autonomous Power Supply of Radio Electronic Devices on the Example of a Wi-Fi Router



Fig. 12. Conversion efficiency

вания Simulink. Входные и выходные переменные в коде MatLab преобразуются во входные и выходные сигналы в Simulink.

Блок содержит также модуль "PWM Generator", который обеспечивает частоту 5000 Гц. В результате моделирования были получены временные зависимости для входного и выходного напряжений (рис. 11).

Из полученных графиков видно, что выходное напряжение поддерживается на уровне 25...26 В, что применимо для питания роутера. Для определения эффективности преобразования были смоделированы графики теоретической и фактической мощностей. Результаты моделирования представлены на рис. 12, где W_{ideal} – теоретическая мощность; W_{PV} – фактическая мощность.

Из полученных зависимостей видно, что эффективность системы на рабочем участке составляет 90 %. В качестве внешнего аккумулятора используется модуль "Battery". В зависимости от уровня заряда происходит переключение между аккумулятором и выходным напряжением СП так, чтобы заряд аккумулятора не опускался ниже 20 % и не превышал 80 %. Этим способом можно значительно продлить срок службы аккумулятора.

Переключение между аккумуляторами осуществляется с помощью блока SWITCH1. При низком уровне заряда аккумулятора включена его зарядка (SW1 = 1). Когда значение на выходе конвертора превышает 22 В, происходит его подключение к нагрузке (SW2 = $0 \rightarrow 1$), аккумулятор при этом отключен (SW3 = 0). При уровне заряда 55 % (< 80 %) заряд аккумулятора продолжается (SW1 = 1). Питание нагрузки при низком выходном напряжении осуществляется аккумулятором, а далее (при увеличении выходного напряжения) происходит отключение аккумулятора от нагрузки и подключение к нему выходного напряжения $(SW2 = 0 \rightarrow 1, SW3 = 1 \rightarrow 0).$ Переключение между источниками питания занимает 0.3 с. При низком выходном напряжении видно уменьшение заряда аккумулятора из-за его разряда на нагрузку. Далее происходит переключение, при котором аккумулятор начинает заряжаться, а питание нагрузки осуществляется выходным напряжением фотовольтаического элемента. При уменьшении выходного напряжения происходит обратное переключение.

Заключение. Согласно расчетам коэффициент заполнения фотовольтаического элемен-

II.

82

Использование фотовольтаических элементов для автономного энергообеспечения приборов радиоэлектроники на примере Wi-Fi-роутера The Use of Photovoltaic Cells for Autonomous Power Supply of Radio Electronic Devices on the Example of a Wi-Fi Router та HVL-105/О составляет 58 %, уступая многим другим видам ФВЯ, но его низкая цена и другие преимущества делают его наиболее подходящим вариантом. Расчет фактически генерируемой фотоэлектрической системой энергии по (1) показал, что данная ФВЯ может применяться для питания Wi-Fi-роутера YF360-H при самых неблагоприятных для солнечных элементов погодных условиях. Были исследованы вольт-амперные и ватт-амперные характеристики фотовольтаического элемента HVL-105/O. Была разработана схема питания, при которой эффективность преобразования системы на рабочем участке составила 90 %. Необходимая емкость внешнего аккумулятора для автономной работы системы в течение 7 дней составила 118 А·ч. Моделирование в среде MatLab продемонстрировало высокую эффективность разработанной системы.

Авторский вклад

Ламкин Иван Анатольевич – руководство научной работой; планирование, моделирование и расчет теоретической модели; редактирование статьи.

Дегтерев Александр Эдуардович – моделирование и расчет теоретической модели; редактирование статьи; анализ литературы.

Михайлов Иван Игоревич – моделирование и расчет теоретической модели; редактирование статьи; анализ литературы.

Романович Мария Михайловна – моделирование и расчет теоретической модели; редактирование статьи. **Патоков Никита Олегович** – анализ литературы.

Тарасов Сергей Анатольевич – постановка задачи и руководство научными исследованиями.

Все авторы участвовали в обсуждении результатов и в подготовке статьи.

Author's contribution

Ivan A. Lamkin, scientific work management; planning, modeling and calculation of a theoretical model; article editing.

Alexander E. Degterev, modeling and calculation of the theoretical model; editing the article; literature analysis. Ivan I. Mikhailov, modeling and calculation of the theoretical model; editing the article; analysis of the literature. Maria M. Romanovich, modeling and calculation of the theoretical model; editing the article. Nikita O. Patokov, literature analysis.

Sergev A. Tarasov, problem setting and scientific research management.

Sergey A. Tarasov, problem setting and scientific research management.

All authors participated in the discussion of the results and in the preparation of the article.

Список литературы

1. Modeling of solar batteries operating modes / S. K. Sheryazov, Y. A. Nikishin, M. V. Schelybaev, A. S. Chigak, A. K. Doskenov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 949. P. 012088. doi:10.1088/1755-1315/949/1/012088

2. Górecki K., Dąbrowski J., Krac E. Modeling Solar Cells Operating at Waste Light // Energies. 2021. Vol. 14 (10). P. 2871. doi: 10.3390/en14102871

3. Исследование влияния угла падения светового воздействия на точность координатных измерений в линейном фоточувствительном приборе с переносом заряда для систем ориентации на Солнце / А. Э. Дегтерев, У. А. Кузьмина, И. А. Ламкин, И. И. Михайлов, М. М. Романович, С. А. Тарасов // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2020. № 10. С. 12–19.

4. Energy-Efficient Modernization of the Nobel's Mansion in Saint Petersburg: Solar Energy Supply Potential / E. Aronova, Ž. Radovanović, V. Murgul, N. Vatin, M. Shvarts // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 725–726. P. 1505–1511. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.1505

5. Мургул В. А. Повышение энергоэффективности реконструируемых жилых зданий исторической застройки Санкт-Петербурга // Архитектон: изв. вузов. 2012. Т. 4, вып. 40. С. 54-62.

6. Solar energy: the physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems / A. Smets, K. Jager, O. Isabella, R. Swaaij, M. Zeman. Cambridge: UIT, 2016. 484 p.

7. Mammano R. Switching power supply topology: voltage mode vs. current mode // Texas Instruments Incorporated. 1999. Dallas, TX, Unitrode Design Note DN-62.

8. Mack R. Basic switching circuits. power sources and supplies / ed. by M. Brown. Netherlands: Elsevier, 2008. P. 13–28. doi: 10.1016/B978-0-7506-8626-6.00002-8

9. Hart D. W. Power electronics. NY: McGraw Hill, 2010. 496 p.

10. Al-Hanahi B. Y., Akin B. MPPT controlled battery charger design and simulation // Majlesi J. of Mechatronic Systems. 2017. Vol. 6, no. 3. P. 7–14.

11. Деменко Т. А., Финенко А. А. Аппаратная реализация алгоритмов для систем управления солнечными батареями // Вестн. МГТУ. 2015. № 2. С. 20–29.

12. Малинин Г. В., Серебрянников А. В. Слежение за точкой максимальной мощности солнечной батареи // Вестн. Чувашского ун-та. 2016. № 3. С. 76–93.

13. Русскин В. А., Семенов С. М., Диксон Р. К. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышающего преобразователя напряжения солнечного инвертора // Изв. Томск. Политех. унта. 2016. Т. 327, № 4. С. 78–87.

14. Reliability modeling of renewable energy sources with energy storage devices / V. Mahajan, S. Mudgal, A. K. Yadav, V. Prajapati // Energy Storage in Energy Markets. NY: Academic Press, 2021. P. 317–368. doi: 10.1016/b978-0-12-820095-7.00003-0

15. Дизайн и стабилизация мощности фотоэлектрической системы с помощью matlab simulink / Х. А. Исса, Л. М. Абдали, К. А. Али, Б. А. Якимович, М. Н. Аль-Малики // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2021, Севастополь, 20–23 сент. 2021/ СевГУ. Севастополь, 2021. С. 281–288.

Информация об авторах

Ламкин Иван Анатольевич — кандидат технических наук (2015), доцент кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 80 научных работ. Сфера научных интересов — электроника; фотоника; солнечная энергетика. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия E-mail: ialamkin@etu.ru

Дегтерев Александр Эдуардович – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2020), аспирант 2-го года обучения Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 16 научных публикаций. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика.

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

Михайлов Иван Игоревич – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2013), ассистент кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 50 научных публикаций. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика; органические светодиоды; коллоидные квантовые точки.

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

E-mail: iimihalov@gmail.com

Романович Мария Михайловна – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2019), аспирант 2-го года обучения Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 12 научных работ. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; агрофотоника.

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

Патоков Никита Олегович – исследователь, преподаватель-исследователь по направлению "Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии" (2021) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – электроника; микроэлектроника; фотоника.

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

Тарасов Сергей Анатольевич – доктор технических наук (2016), заведующий кафедрой фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 160 научных работ. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика.

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

E-mail: satarasov@etu.ru

References

1. Sheryazov S. K., Nikishin Y. A., Schelybaev M. V., Chigak A. S., Doskenov A. K. Modeling of Solar Batteries Operating Modes. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2022, vol. 949, p. 012088. doi:10.1088/1755-1315/949/1/012088

2. Górecki K., Dąbrowski J., Krac E. Modeling Solar Cells Operating at Waste Light. Energies. 2021, vol. 14 (10), p. 2871. doi: 10.3390/en14102871 3. Degterev A. E., Kuzmina U. A., Lamkin I. A., Mikhailov I. I., Romanovich M. M., Tarasov S. A. Study of the Angle Influence of the Incidence Light Impact on the Accuracy of Coordinate Measurements in a Linear Photosensitive Device with Charge Transfer for Orientation Systems on the Sun. Izvestia SPbETU "LETI". 2020, vol. 10, pp. 12–19. (In Russ.)

Использование фотовольтаических элементов для автономного энергообеспечения приборов радиоэлектроники на примере Wi-Fi-poyтера The Use of Photovoltaic Cells for Autonomous Power Supply of Radio Electronic Devices on the Example of a Wi-Fi Router 4. Aronova E., Radovanović Ž., Murgul V., Vatin N., Shvarts M. Energy-Efficient Modernization of the Nobel's Mansion in Saint Petersburg: Solar Energy Supply Potential. Applied Mechanics and Materials. 2015, vol. 725–726, pp. 1505–1511. doi: 10.4028/ www.scientific.net/AMM.725-726.1505

5. Murgul V. A. Increasing the energy efficiency of residential buildings in the historical area of St Petersburg. Architecton: Proc. of Higher Education. 2012, vol. 4 (40), pp. 54–62. (In Russ.)

6. Smets A., Jager K., Isabella O., Swaaij R., Zeman M. Solar Energy: the Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems. Cambridge, UIT, 2016, 484 p.

7. Mammano R. Switching Power Supply Topology: Voltage Mode vs. Current Mode. Texas Instruments Incorporated. 1999. Dallas, TX, Unitrode Design Note DN-62.

8. Mack R. Basic Switching Circuits. Power Sources and Supplies. Ed. by M. Brown. Netherlands, Elsevier, 2008, pp. 13–28. doi: 10.1016/B978-0-7506-8626-6.00002-8

9. Hart D. W. Power Electronics. NY, McGraw Hill, 2010, 496 p.

10. Al-Hanahi B. Y., Akin B. MPPT Controlled Battery Charger Design And Simulation. Majlesi J. of Mechatronic Systems. 2017, vol. 6, no. 3, pp. 7–14.

11. Demenko T. A., Finenko A. A. Hardware Implementation of Algorithms for Solar Panels Control Systems. Bulletin of MSTU. 2015, no. 20, pp. 20–29. (In Russ.)

12. Malinin G. V., Serebryannikov A. V. Maximum Power Point Tracking for PV Array // Bulletin of the Chuvash University. 2016, no. 3, pp. 76–93. (In Russ.)

13. Russkin V. A., Semenov S. M., Dixon R. C. Study of Algorithms for Tracking Maximum Power Point for Boost Dc-Dc Converter of Solar Inverter // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2016, vol. 327, no. 4, pp. 78–87. (In Russ.)

14. Mahajan V., Mudgal S., Yadav A. K., Prajapati V. Reliability Modeling of Renewable Energy Sources with Energy Storage Devices. Energy Storage in Energy Markets. NY, Academic Press, 2021, pp. 317–368. doi: 10.1016/b978-0-12-820095-7.00003-0

15. Issa Kh. A., Abdali L. M., Ali K. A., Yakimovich B. A., Al-Maliki M. N. Design and Power Constancy of a Photovoltaic System by Using MATLAB Simulink. Ecological, industrial and energy safety – 2021, Sevastopol, 20–23 Sept. 2021. Sevastopol, SevGU, 2021, pp. 281–288. (In Russ.)

Information about the authors

Ivan A. Lamkin, Cand. Sci. (Eng.) (2015), Associate Professor at the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 80 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; solar energy.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: ialamkin@etu.ru

Alexander E. Degterev, Master in "Electronics and Nanoelectronics" (2020), 2nd year Postgraduate Student of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 16 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; solar energy.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: aedegterev@etu.ru

Ivan I. Mikhailov, Master in Electronics and Nanoelectronics (2013), assistant of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 50 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; solar energy; organic light-emitting diodes; colloidal quantum dots.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: iimihalov@gmail.com

Maria M. Romanovich, Master in "Electronics and Nanoelectronics" (2020), 2nd year Postgraduate Student of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 12 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; agrophotonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: mmromanovich@etu.ru

Nikita O. Patokov – Researcher, teacher-researcher in the field of "Photonics, instrumentation, optical and biotechnical systems and technologies" (2021) Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 2 scientific publications. Area of expertise: electronics; microelectronics; photonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: patocov@mail.ru

Sergey A. Tarasov, Dr Sci. (Eng.) (2019), Head of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 160 scientific publications. Area of expertise: interests: electronics; photonics; solar energy.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: satarasov@etu.ru

Электроника СВЧ УДК 539.216 https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-3-86-95

Оригинальная статья

Структурные и электрические свойства стеклокерамических сегнетоэлектрических композитных материалов

А. В. Тумаркин ¹[∞], Е. Н. Сапего ¹, А. Г. Гагарин ¹, Н. Г. Тюрнина ², З. Г. Тюрнина ², О. Ю. Синельщикова ², С. И. Свиридов ²

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

² Институт химии силикатов РАН, Санкт-Петербург, Россия

[™] avtumarkin@yandex.ru

Аннотация

Введение. Материалы, обладающие высокой диэлектрической проницаемостью, актуальны для использования в современной сверхвысокочастотной электронике в составе управляемых конденсаторов высокой энергетической плотности, систем преобразования энергии, мощных передающих антенн. Наиболее перспективными материалами для применения в упомянутых устройствах являются сегнетоэлектрики, обладающие высокой диэлектрической нелинейностью. Для увеличения электрической прочности сегнетоэлектрических материалов сегодня разрабатываются композитные структуры на основе смешения сегнетоэлектриков с линейными диэлектриками – материалами, обладающими малой диэлектрической прочностью, но высокой электрической прочностью. Преимуществом такого подхода является возможность создания новых многокомпонентных материалов с недостижимыми ранее свойствами и возможность регулировать компонентный состав, размеры включений и электрические свойства композитов в широких пределах. На основе пористого калийжелезосиликатного стекла (KFS), полученного методом ионного обмена, синтезированы стеклокерамические материалы, содержащие титанат бария, с целью использования на сверхвысоких частотах. Показано, что отжиг стеклокерамических композитов в кислородной среде положительно влияет на их структурные и электрические характеристики. Стеклокерамические образцы демонстрируют значительное увеличение диэлектрической проницаемости и снижение потерь после высокотемпературной обработки в кислороде.

Цель работы. Получение стеклокомпозитов посредством низкотемпературного спекания предварительно синтезированного BaTiO₃ (BTO) и калийжелезосиликатного стекла, а также характеризация структуры и электрических свойств композитов на сверхвысоких частотах (СВЧ).

Материалы и методы. Кристаллическая структура и фазовый состав полученных пленок исследовались методом рентгеновской дифракции с помощью дифрактометра ДРОН-6 на эмиссионной спектральной линии CuK_{α1} (λ = 1.5406 Å). Диэлектрическая проницаемость ε образцов на CBЧ оценивалась методом Николсона–Росса при комнатной температуре с использованием Agilent E4980A LCR-meter.

Результаты. Согласно данным рентгеноструктурного анализа, синтезированные образцы представляют собой смесь KFS, сегнетоэлектрического BaTiO₃ и диэлектрических полититанатов бария; соотношение последних определяет электрические свойства композитов. В зависимости от содержания титаната бария исследуемые образцы демонстрируют диэлектрическую проницаемость от 50 до 270 при уровне диэлектрических потерь 0.1...0.02.

Для исследуемых образцов, подверженных отжигу в кислородной среде, после высокотемпературной обработки наблюдается увеличение диэлектрической проницаемости на 10...25 % и рост управляемости при уменьшении диэлектрических потерь в среднем в 2 раза.

Заключение. Наиболее перспективным с точки зрения структурных и электрических свойств представляется композит состава с массовой долей ВТО 70 % и массовой долей KFS 30 %. Для данного композита наблюдается увеличение диэлектрической проницаемости на 25 %, существенный рост нелинейности при одновременном снижении потерь более чем в 2 раза в результате отжига в кислородной среде.

Ключевые слова: стеклокерамические композиты, титанат бария, железосодержащее стекло, СВЧ Для цитирования: Структурные и электрические свойства стеклокерамических сегнетоэлектрических композитных материалов / А. В. Тумаркин, Е. Н. Сапего, А. Г. Гагарин, Н. Г. Тюрнина, З. Г. Тюрнина, О. Ю. Синельщикова, С. И. Свиридов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 3. С. 86–95. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-86-95

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-01024-21-02 от 29.09.2021 (проект FSEE-2021-0014), при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-07-00600).

Статья поступила в редакцию 01.12.2021; принята к публикации после рецензирования 17.03.2022; опубликована онлайн 28.06.2022

© Тумаркин А. В., Сапего Е. Н., Гагарин А. Г., Тюрнина Н. Г., Тюрнина З. Г., Синельщикова О. Ю., Свиридов С. И., 2022



Original article

Structural and Electrical Properties of Glass-Ceramic Ferroelectric Composite Materials

Andrey V. Tumarkin ¹[™], Evgeny N. Sapego ¹, Alexander G. Gagarin ¹, Natalya G. Tyurnina², Zoya G. Tyurnina², Olga Yu. Sinelshchikova², Sergey I. Sviridov²

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² Institute of Silicate Chemistry of Russian Academy of Sciences, St Petersburg, Russia

[™] avtumarkin@yandex.ru

Abstract

Introduction. Materials exhibiting high dielectric permittivity are relevant for use in modern ultrahigh-frequency electronics. Among them, ferroelectrics with high dielectric nonlinearity present particular interest. The electrical strength of ferroelectric materials can be increased using modern composite structures based on mixing ferroelectrics and linear dielectrics - materials exhibiting simultaneously low dielectric permittivity and high electrical strength. This approach provides for the opportunity of creating new multicomponent materials with previously unattainable properties and adjusting their component composition, inclusion size and electrical properties across a wide range. In this work, on the basis of porous potassium-iron-silicate glass (KFS) obtained by ion exchange, glass-ceramic materials containing barium titanate were synthesized for use at ultrahigh frequencies.

Aim. Production of glass composites by low-temperature sintering of pre-synthesized BaTiO₃ (BTO) and potassium-ironsilicate glass, as well as characterization of their structural and electrical properties at ultrahigh frequencies (microwave).

Materials and methods. The crystal structure and phase composition of the obtained films were studied by X-ray diffraction using a DRON-6 diffractometer by the emission spectral line $CuK_{\alpha l}$ ($\lambda = 1.5406$ Å). The dielectric permittivity (ɛ) of microwave samples was evaluated by the Nicholson-Ross method at room temperature using an Agilent E4980A LCR-meter.

Results. According to X-ray diffraction analysis, the synthesized samples are a mixture of KFS glass, ferroelectric BaTiO₃ and dielectric barium polytitanates; the ratio of the latter determines the electrical properties of the composites. Depending on the content of barium titanate, the studied samples demonstrate a dielectric constant from 50 to 270 at a dielectric loss level of 0.1...0.02. The samples subjected to annealing in an oxygen medium showed an increase in dielectric permittivity by 10...25 % and an increase in controllability with a decrease in dielectric losses by an average of two times.

Conclusion. The composite composition of 70 wt % BTO /30 wt % KFS was found to be the most promising in terms of structural and electrical properties. This composite showed an increase in dielectric permittivity by 25 % and a significant increase in nonlinearity, at the same time as reducing losses by more than two times as a result of annealing in an oxygen medium.

Keywords: glass-ceramic composites, barium titanate, iron-containing glass, microwave

For citation: Tumarkin A. V., Sapego E. N., Gagarin A. G., Tyurnina N. G., Tyurnina Z. G., Sinelshchikova O. Yu., Sviridov S. I. Structural and Electrical Properties of Glass-Ceramic Ferroelectric Composite Materials. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 86–95. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-86-95

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

Source of financing. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № 075-01024-21-02 dated 29.09.2021 (grant number no. FSEE-2021-0014) and Russian Science Foundation project no. 19-07-00600.

Submitted 01.12.2021; accepted 17.03.2022; published online 28.06.2022

Введение. Сегнетоэлектрические (СЭ) материалы представляют большой интерес для сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники из-за их нелинейного отклика на электрическое поле. На основе СЭ-материалов созданы такие СВЧустройства, как перестраиваемые конденсаторы, линии задержки, фазовращатели и др. [1-3].

Однако, как и любые функциональные ма-

териалы, сегнетоэлектрики имеют ряд недостатков, ограничивающих их применение в СВЧ-устройствах. Слабыми сторонами СЭматериалов являются достаточно высокие СВЧпотери, сильная зависимость свойств от температуры и трудности согласования материала с большой диэлектрической проницаемостью с СВЧ-цепями [4].

Один из путей улучшения функциональных характеристик СЭ-материалов - создание композитных структур, сочетающих сегнетоэлектрики и линейные диэлектрики [5-8]. Такой подход позволяет управлять диэлектрической проницаемостью и потерями за счет изменения концентрации сегнетоэлектрических включений в композите. Преимуществом данного подхода является возможность создания материалов с новыми свойствами: структур с целенаправленно формируемой дисперсионной характеристикой; структур с заданным распределением субмиллиметровых неоднородностей, определяющих их частотную и пространственную селективность при взаимодействии с электромагнитными волнами; структур с любой заданной диэлектрической проницаемостью со значениями от единиц до нескольких сотен для реализации сложных функциональных устройств СВЧ-электроники [9-15].

Цель исследований, описываемых в данной статье, – получение сегнетоэлектрических стеклокомпозитов посредством низкотемпературного спекания предварительно синтезированного ВаTiO₃ и калийжелезосиликатного стекла, а также характеризация структуры и электрических свойств композитов на сверхвысоких частотах.

Методы. В качестве исходных реактивов для получения $BaTiO_3$ использовались химически чистые $TiCl_4$, $Ba(NO_3)_2$, NH_4OH , HNO_3 и $C_2H_5NO_2$. Хлорид титана растворялся в охлажденной воде в объемном соотношении 1:5, после чего осаждался водным раствором аммиака. Полученный осадок тщательно промывался дистиллированной водой и растворялся в 1.4 моль/л растворе азотной кислоты. Концентрацию полученного раствора $TiO(NO_3)_2$ проверяли весовым методом, после чего в него добавляли предварительно подготовленные растворы нитрата

бария и глицина в молярном соотношении $1 \operatorname{TiO}(\operatorname{NO}_3)_2:1 \operatorname{Ba}(\operatorname{NO}_3)_2:2.4 \operatorname{C}_2\operatorname{H}_5\operatorname{NO}_2$. Полученная смесь сушилась при 80 °C, после чего сжигалась в фарфоровом тигле при температуре 650 °C в течение 1 ч на воздухе. Образовавшийся при сжигании объемный пористый спек белого цвета измельчался вручную в агатовой ступке и подвергался дополнительной термообработке при температуре 950 °C в течение 5 ч. Полноту формирования титаната бария контролировали с помощью рентгенофазового анализа.

В качестве исходных реагентов для синтеза железосодержащего стекла использовали химически чистые реактивы (K_2CO_3 , Fe_2O_3 и SiO₂). Варку стекла проводили в платиновом тигле при температуре 1500 °C в воздушной атмосфере силитовой печи в течение 2 ч с последующим отжигом при температуре 600 °C.

Для получения стеклокерамических композитов исходное KFS измельчалось с добавлением этилового спирта в планетарной мельнице Pulverisette 6 (Fritsch) с использованием яшмовой размольной гарнитуры в течение 20 мин с частотой вращения 350 мин⁻¹ и смешивалось с ВаТіО₃ (массовая доля ВаТіО₃ 10...99 %). Для гомогенизации полученной стеклокерамической композиции исходные навески, взятые в нужных пропорциях, были перемешаны вручную с добавлением этилового спирта и спрессованы в таблетки диаметром 10 мм и высотой 1 мм (Пресс ЛПГ 20, усилие 4 т). Для улучшения механических свойств полученных стеклокерамических композитов спрессованные таблетки были термообработаны при температуре 630 °С в течение 60 мин (температура обжига была подобрана таким образом, чтобы обеспечить оплавление образца, т. е. выше температуры стеклования).

Рентгеновские дифракционные картины образцов получали методом рентгенофазового анализа (РФА) с помощью дифрактометра ДРОН-3 ($\lambda = 0.154$ нм, Cu $K_{\alpha l}$) при комнатной температуре.

Диэлектрическая проницаемость є образцов на СВЧ оценивалась методом Николсона–Росса. Для этого использовалась микрополосковая линия передачи, подключенная к векторному сетевому анализатору. В описываемой работе были измерены коэффициент отражения и фаза коэффициента пропускания на частоте 3 ГГц, когда образцы накладывались на линию передачи. Затем данные измерений были пересчитаны в диэлектрическую проницаемость. Диэлектрические потери (tg δ) стеклокерамических структур измеряли в плоскопараллельных образцах с серебряными электродами на частоте 1 МГц при комнатной температуре с использованием Agilent E4980A LCR-meter.

Результаты. На рис. 1 представлены сравнительные дифрактограммы образцов, содержащих различное количество титаната бария, до и после отжига в кислородной атмосфере. По данным РФА, термообработка смесей не приводит к химическому взаимодействию между стеклом и кристаллической фазой: в образцах, содержащих 30 % и более титаната бария, присутствует выраженная фаза BaTiO₃ (номер в базе международного центра дифракционных данных – Pdf 5-626). Также на дифрактограммах присутствуют рефлексы вторичных полититанатов бария, обозначенные *. Кроме того, обращают на себя внимание затянутые передние фронты рефлексов (200) и (211), а также сдвиг рефлексов (110) в сторону больших углов, что также может быть связано с присутствием в композите кристаллических фаз вторичных полититанатов бария, таких, как ВаТі₂О₅, ВаТі₃О₇, ВаТі₄О₉ и т. д.

При сопоставлении дифрактограмм до и после отжига обращают на себя внимание 3 фактора:

 – для образца 30 % ВТО отжиг способствует как улучшению кристаллической структуры титаната бария, так и росту интенсивности рефлексов вторичных фаз;

 увеличение интенсивности рефлексов титаната бария в результате отжига, свидетельствующее об улучшении кристаллической структуры, наиболее выражено для образца 70 % ВТО;

– смещение позиций рефлексов в сторону больших углов и увеличение интегральной ширины пиков для образца 95 % ВТО может быть объяснено частичным превращением титаната бария в полититанаты в кислородной среде.

Таким образом, наиболее благоприятное воздействие отжиг оказал на образец 70 % BTO/30 % KFS.



Рис. 1. Дифрактограммы стеклокерамических композитов различного состава до (нижний спектр) и после (верхний спектр) отжига в кислороде: a – 30 % BTO; б – 70 % BTO; в – 95 % BTO

Fig. 1. X-Ray diffraction of glass-ceramic composites of various compositions before (bottom) and after (top) annealing in oxygen: a - 30 % BTO; $\delta - 70$ % BTO; $\epsilon - 95$ % BTO

Изображения поверхности композита, содержащего 70 % ВТО и 30 % КFS до (*a*) и после отжига (*б*) в кислороде, полученные в режиме обратного рассеяния электронов, показаны на рис. 2. Согласно данным сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), образец как до, так и после отжига представляет собой двухкомпонентный композит, состоящий из титаната бария и стеклянных зерен. Сегнетоэлектрическую фазу можно рассматривать как матричную, поскольку массовая доля ВТО в композите 70 %. Принадлежность зерна к титанату бария или к KFS определялась с помощью энергодисперсионного анализа (ЭДА). Перед отжигом в кислороде титанат бария (свет-

Структурные и электрические свойства стеклокерамических сегнетоэлектрических композитных материалов Structural and Electrical Properties of Glass-Ceramic Ferroelectric Composite Materials



Puc. 2. Данные СЭМ-композита, содержащего 70 % ВТО и 30 % KFS: *a* – до отжига в кислороде;
 δ – после отжига в кислороде
 Fig. 2. SEM data of a composite containing 70 % ВТО

and 30 % KFS: a – before annealing in oxygen; δ – after annealing in oxygen

лые зерна) представляет собой мелкодисперсную фазу с размерами зерен от 0.3 до 1.5 мкм, гранулы KFS (темные зерна) достигают размеров 2...10 мкм.

Микрофотографии позволяют оценить изменения морфологии поверхности стеклокерамических образцов в результате отжига. Анализ интегрального распределения зерен KFS по размерам, проведенный методом обработки изображений с использованием программы ІтаgeJ, указывает на незначительное уменьшение размера зерен фазы KFS после отжига до 1...8 мкм. Распределение зерен фазы BTO становится более равномерным после отжига, а сама фаза становится мелкодисперсной с размерами зерен 0.2...1 мкм.

Результаты энергодисперсионного анализа композита до и после отжига, усредненные по 20 точкам на площади 100 × 100 мкм, представлены в таблице. Данные ЭДА указывают на то, что элементный состав композита приблизительно соответствует составу порошка-прекурсора ВТО/КFS с учетом точности анализа ЭДА. Другие исследованные композиты демонстрируют те же тенденции в элементном составе.

На рис. 3 представлена зависимость диэлектрической проницаемости отожженных сегнетоэлектрических композитов от их компонентного состава в диапазоне частот 3...10 ГГц. Образцы можно условно разделить на две группы: композиты с содержанием тита-



Рис. 3. Диэлектрическая проницаемость образцов с различным содержанием титаната бария после отжига в кислороде

Fig. 3. Permittivity of samples with different barium titanate content after annealing in oxygen

Средние значения содержания элементов в композите 70 % BTO / 30 % KFS до и после отжига в кислороде Average values of elemental composition in the composite 70 % BTO / 30 % KFS before and after annealing in oxygen

Стадия	O, %	К, %	Fe, %	Si, %	Ba, %	Ti, %	Общ., %
До отжига	60.2	3.1	4.4	11.4	10	10.8	100
После отжига	60.3	4.4	7.0	12.4	8.2	7.7	100



Рис. 4. Диэлектрические потери образцов с различным содержанием титаната бария после отжига в кислороде

Fig. 4. Dielectric losses of samples with different barium titanate content after annealing in oxygen

ната бария до 50 %, проявляющие є менее 100, и композиты, содержащие от 70 до 99 % ВТО, демонстрирующие проницаемость в диапазоне 200...280. Для всех исследуемых образцов, подверженных отжигу в кислородной среде, после высокотемпературной обработки наблюдается увеличение диэлектрической проницаемости на 10...25 %

На рис. 4 представлены зависимости диэлектрических потерь исследуемых композитов от напряженности управляющего поля в положительной и отрицательной полярностях, измеренные на частоте 1 МГц. Хорошо заметен рост tg δ при увеличении концентрации титаната бария в составе композита. С точки зрения уровня потерь наибольший интерес представляет состав 70 % ВТО/30 % KFS.

На рис. 5 приведены зависимости нормированной на максимальное значение емкости образцов, содержащих 70 и 95 % ВТО, от напряженности приложенного управляющего поля. Сравнение образцов до и после высокотемпературной обработки в кислороде однозначно свидетельствует в пользу последней. С учетом диэлектрических потерь на уровне tg $\delta = 0.06$ изменение емкости (управляемость) образца с содержанием 70 % ВТО на 3 % в поле 1.6 В/мкм представляется перспективным для СВЧ-применений.

Отметим, что композиты составов 70 и 95 % ВТО проявляют близкую нелинейность после отжига в кислородной среде при существенно различной концентрации нелинейного диэлектрика в композите. Высокотемператур-

.....







ная обработка в кислороде оказывает различное влияние на химический состав исследуемых образцов (соотношение BaTiO₃ и полититанатов бария), что и определяет их электрические свойства.

Обсуждение. Согласно данным рентгеноструктурного анализа синтезированные образцы представляют собой смесь KFeSi-стекла, сегнетоэлектрического BaTiO₃ и диэлектрических полититанатов бария; соотношение последних определяет электрические свойства композитов. В зависимости от содержания титаната бария исследуемые образцы демонстрируют диэлектрическую проницаемость от 50 до 270 при уровне диэлектрических потерь 0.1...0.02.

Для исследуемых образцов, подверженных отжигу, после высокотемпературной обработки наблюдается увеличение диэлектрической проницаемости на 10...25 % и рост управляемости при уменьшении диэлектрических потерь в среднем в 2 раза.

Наиболее перспективным с точки зрения структурных и электрических свойств представляется композит состава 70 % ВТО/30 % КFS, демонстрирующий минимальные значения пористости и максимальные значения микротвердости. Для данного композита наблюдается увеличение диэлектрической проницаемости на 25 %, существенный рост нелинейности при одновременном снижении потерь более чем в 2 раза в результате отжига в кислородной среде.

Структурные и электрические свойства стеклокерамических
сегнетоэлектрических композитных материалов
Structural and Electrical Properties of Glass-Ceramic Ferroelectric Composite Materials

Авторский вклад

Тумаркин Андрей Вилевич – руководство и постановка исследований, обсуждение результатов, структурные измерения.

Сапего Евгений Николаевич – литературный обзор, структурные исследования.

Гагарин Александр Геннадиевич – электрофизические исследования.

Тюрнина Наталья Геральдовна – синтез образцов.

Тюрнина Зоя Геральдовна – исследования структурных и химических свойств синтезированных образцов. **Синельщикова Ольга Юрьевна** – высокотемпературная обработка синтезированных образцов.

Свиридов Сергей Иванович – постановка химических исследований синтезированных образцов.

Author's contribution

Andrey V. Tumarkin, management and formulation of research, discussion of results, structural measurements. Evgeny N. Sapego, literary review, structural investigation.

Alexander G. Gagarin, electrophysical investigation.

Natalya G. Tyurnina, synthesis of samples.

Zoya G. Tyurnina, studies of the structural and chemical properties of synthesized samples.

Olga Yu. Sinelshchikova, high-temperature processing of synthesized samples.

Sergey I. Sviridov, setting up chemical studies of synthesized samples.

Список литературы

1. Design and development of a tunable ferroelectric microwave surface mounted device / C. Borderon, S. Ginestar, H. W. Gundel, A. Haskou, K. Nadaud, R. Renoud, A. Sharaiha // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2020. Vol. 67, № 9. P. 1733–1737. doi: 10.1109/TUFFC.2020.2986227

2. Frequency tunable antennas based on innovative materials / L. Huitema, A. Crunteanu, H. Wong, A. Ghalem, M. Rammalet // IEEE Intern. Conf. on Computational Electromagnetics (ICCEM), Kumamoto, Japan, 8–10 March 2017. P. 28–30. doi: 10.1109/COMPEM.2017.7912722

3. Characterization and Performance Analysis of BST-Based Ferroelectric Varactors in the Millimeter-Wave Domain / A. Crunteanu, V. Muzzupapa, A. Ghalem, L. Huitema, D. Passerieux, C. Borderon, R. Renoud, H. W. Gundel // Crystals. 2021. Vol. 11, № 3. P. 277. doi: 10.3390/cryst11030277

4. Nguyen Q. M., Anthony T. K., Zaghloul A. I. Free-Space-Impedance-Matched composite dielectric metamaterial with high refractive index // IEEE Antennas and Wireless Propagation Let. 2019. Vol. 18, № 12. P. 2751–2755. doi: 10.1109/LAWP.2019.2951122

5. Hao X. A review on the dielectric materials for high energy-storage application // J. of Advanced Dielectrics. 2013. Vol. 03, N_{P} 1. P. 1330001. doi: 10.1142/S2010135X13300016

6. Homogeneous/inhomogeneous-structured dielectrics and their energy-storage performances / Z. Yao, Z. Song, H. Hao, Z. Yu, M. Cao, Sh. Zhang, M. T. Lanagan, H. Liu // Advanced Materials. 2017. Vol. 29, № 20. P. 1601727. doi: 10.1002/adma.201601727

7. Qi H., Zuo R. Linear-like lead-free relaxor antiferroelectric (Bi_{0.5}Na_{0.5})TiO₃–NaNbO₃ with giant energy-storage density/efficiency and super stability against temperature and frequency // J. of Materials Chemistry A. 2019. Vol. 7, № 8. P. 3971–3978. doi: 10.1039/C8TA12232F

.....

8. Novel BiFeO₃–BaTiO₃–Ba(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ lead-free relaxor ferroelectric ceramics for energy-storage capacitors / D. Zheng, R. Zuo, D. Zhang, Y. Li // J. of the American Ceramic Society. 2015. Vol. 98, № 9. P. 2692–2695. doi: 10.1111/jace.13737

9. Low permittivity ferroelectric composite ceramics for tunable applications / E. A. Nenasheva, N. F. Kartenko, I. M. Gaidamaka, S. S. Redozubov, A. B. Kozyrev, A. D. Kanareykin // Ferroelectrics. 2017. Vol. 506, № 1. P. 174–183. doi: 10.1080/00150193.2017.1282761

10. Observation of an anomalous correlation between permittivity and tunability of a doped (Ba,Sr)TiO₃ ferroelectric ceramic developed for microwave applications / A. B. Kozyrev, A. D. Kanareykin, E. A. Nenasheva, V. N. Osadchy, D. M. Kosmin // Applied Physics Let. 2009. Vol. 95, № 1. P. 012908. doi: 10.1063/1.3168650

11. Microstructures and dielectric tunable properties of $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ -MgO-Mg₃B₂O₆ composite ceramics / Z. He, B. Liu, Ch. Li, Y. He // Ceramics International. 2015. Vol. 41, No 5. P. 6286–6292. doi: 10.1016/j.ceramint.2015.01.053

12. Mahmoud A. E., Moeen S., Gerges M. K. Enhancing the tunability properties of pure (Ba,Sr)TiO₃ lead-free ferroelectric by polar nanoregion contributions // J. of Materials Science: Materials in Electronics. 2021. Vol. 32, № 10. P. 13248–13260. doi: 10.1007/s10854-021-05879-6

13. High-Frequency Characteristics of (Ba,Sr)TiO₃ Tunable Ceramics with Various Additives Intended for Accelerator Physics / E. A. Nenasheva, A. D. Kanareykin, A. I. Dedyk, S. F. Karmanenko, A. S. Semenov // Integrated Ferroelectrics. 2005. Vol. 70, № 1. P. 107–113. doi: 10.1080/10584580490895275

14. The abnormal increase of tunability in ferroelectricdielectric composite ceramics and its origin / X. Ma, S. Li, Y. He, T. Liu, Y. Xu // J. of Alloys and Compounds. 2018. Vol. 739. P. 755–763. doi: 10.1016/j.jallcom.2017.12.279

.....

15. The effect of transition metal oxides on the tunablility and microwave dielectric properties of Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO₃– BaWO₄ composite ceramics / M. Zhang, J. Zhai, Bo. Shen, X. Yao // Materials Chemistry and Physics. 2011. Vol. 128, № 3. P. 525–529. doi: 10.1016/j.matchemphys.2011.03.043

Информация об авторах

Тумаркин Андрей Вилевич – доктор технических наук (2017), доцент (2005), профессор кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – технология и свойства функциональных материалов.

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

E-mail: avtumarkin@yandex.ru

https://orcid.org/0000-0001-9858-3846

Сапего Евгений Николаевич – исследователь (аспирантура Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), 2021), младший научный сотрудник (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), 2019). Автор 15 научных работ. Сфера научных интересов – технология и свойства функциональных материалов.

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

E-mail: ensapego@yandex.ru

https://orcid.org/0000-0002-1124-4081

Гагарин Александр Геннадиевич – кандидат технических наук (2007), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – применение сегнетоэлектриков в СВЧ-электронике.

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

E-mail: aggagarin@etu.ru

https://orcid.org/0000-0001-5673-2372

Тюрнина Наталья Геральдовна – кандидат химических наук (2009), заместитель директора по научной работе, старший научный сотрудник Института химии силикатов им. И. В. Гребенщикова Российской академии наук. Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – изучение фазовых равновесий в силикатных системах; синтез биоактивных материалов; исследование и анализ механизма и кинетики формирования новых материалов в процессе ионного обмена; исследование физико-химических и термодинамических свойств синтезированных материалов; синтез новых неорганических функциональных материалов.

Адрес: Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова Российской академии наук, наб. Макарова, д. 2, Санкт-Петербург, 199034, Россия

E-mail: turnina.ng@iscras.ru

https://orcid.org/0000-0001-9410-8917

Тюрнина Зоя Геральдовна – кандидат химических наук (2008), старший научный сотрудник Института химии силикатов им. И. В. Гребенщикова Российской академии наук. Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – изучение термодинамических свойств; исследования физико-химических свойств стекол и расплавов; проведение ионообменной обработки стекол в расплаве солей; исследование и анализ механизма и кинетики формирования пористых стекол, образующихся в результате ионного обмена между щелочными катионами стекла и катионами солевого расплава; синтез новых неорганических функциональных материалов.

Адрес: Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова Российской академии наук, наб. Макарова, д. 2, Санкт-Петербург, 199034, Россия

E-mail: turnina.zg@iscras.ru

https://orcid.org/0000-0003-3134-7309

Синельщикова Ольга Юрьевна – кандидат химических наук (2010), старший научный сотрудник Лаборатории физико-химического конструирования и синтеза функциональных материалов Института химии силикатов им. И. В. Гребенщикова Российской академии наук. Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – синтез и свойства функциональных неорганических материалов.

Адрес: Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова Российской академии наук, наб. Макарова, д. 2, Санкт-Петербург, 199034, Россия

E-mail: sinelshikova@mail.ru

https://orcid.org/0000-0003-0207-8429

Структурные и электрические свойства стеклокерамических сегнетоэлектрических композитных материалов Structural and Electrical Properties of Glass-Ceramic Ferroelectric Composite Materials

Свиридов Сергей Иванович – доктор химических наук (2001), ведущий научный сотрудник Института химии силикатов им. И. В. Гребенщикова Российской академии наук. Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – диффузия и кинетика межфазных взаимодействий в оксидных стеклах; создание защитных покрытия; синтез новых неорганических функциональных материалов.

Адрес: Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова Российской академии наук, наб. Макарова, д. 2, Санкт-Петербург, 199034, Россия

E-mail: sviridov@iscras.ru

https://orcid.org/0000-0003-1085-8900

References

1. Borderon C., Ginestar S., Gundel H. W., Haskou A., Nadaud K., Renoud R., Sharaiha A. Design and Development of a Tunable Ferroelectric Microwave Surface Mounted Device. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2020, vol. 67, no. 9, pp. 1733–1737. doi: 10.1109/TUFFC.2020.2986227

2. Huitema L., Crunteanu A., Wong H., Ghalem A., Rammalet M. Frequency Tunable Antennas Based on Innovative Materials. IEEE Intern. Conf. on Computational Electromagnetics (ICCEM), Kumamoto, Japan, 8-10 March 2017, pp. 28-30. doi: 10.1109/COMPEM.2017.7912722

3. Crunteanu A., Muzzupapa V., Ghalem A., Huitema L., Passerieux D., Borderon C., Renoud R., Gundel H. W. Characterization and Performance Analysis of BST-Based Ferroelectric Varactors in the Millimeter-Wave Domain. Crystals. 2021, vol. 11, no. 3, p. 277. doi: 10.3390/cryst11030277

4. Nguyen Q. M., Anthony T. K., Zaghloul A. I. Free-Space-Impedance-Matched Composite Dielectric Metamaterial with High Refractive Index. IEEE Antennas and Wireless Propagation Let. 2019, vol. 18, no. 12, pp. 2751-2755. doi: 10.1109/LAWP.2019.2951122

5. Hao X. A Review on the Dielectric Materials for High Energy-Storage Application. J. of Advanced Dielectrics. 2013, vol. 3, no. 1, p. 1330001. doi: 10.1142/ S2010135X13300016

6. Yao Z., Song Z., Hao H., Yu Z., Cao M., Zhang Sh., Lanagan M. T., Liu H. Homogeneous/Inhomogeneous-Structured Dielectrics and Their Energy-Storage Performances. Advanced Materials. 2017, vol. 29, no. 20, p. 1601727. doi: 10.1002/adma.201601727

7. Qi H., Zuo R. Linear-Like Lead-Free Relaxor Antiferroelectric (Bi0.5Na0.5)TiO3-NaNbO3 with Giant Energy-Storage Density/Efficiency and Super Stability Against Temperature and Frequency. J. of Materials Chemistry A. 2019, vol. 7, no. 8, pp. 3971-3978. doi: 10.1039/C8TA12232F

8. Zheng D., Zuo R., Zhang D., Li Y. Novel BiFeO3-BaTiO₃-Ba(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ Lead-Free Relaxor Ferroelectric Ceramics for Energy-Storage Capacitors. J. of the American

.....

Ceramic Society. 2015, vol. 98, no. 9, pp. 2692-2695. doi: 10.1111/jace.13737

9. Nenasheva E. A., Kartenko N. F., Gaidamaka I. M., Redozubov S. S., Kozyrev A. B., Kanareykin A. D. Low Permittivity Ferroelectric Composite Ceramics for Tunable Applications. Ferroelectrics. 2017, vol. 506, no. 1, pp. 174-183. doi: 10.1080/00150193.2017.1282761

10. Kozyrev A. B., Kanareykin A. D., Nenasheva E. A., Osadchy V. N., Kosmin D. M. Observation of an Anomalous Correlation between Permittivity and Tunability of a Doped (Ba,Sr)TiO₃ Ferroelectric Ceramic Developed for Microwave Applications. Applied Physics Let. 2009, vol. 95, no. 1, p. 012908. doi: 10.1063/1.3168650

11. He Z., Liu B., Li Ch., He Y. Microstructures and Dielectric Tunable Properties of Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO₃-MgO–Mg₃B₂O₆ Composite Ceramics. Ceramics Intern. 2015, vol. 41, no. 5, pp. 6286-6292. doi: 10.1016/ j.ceramint.2015.01.053

12. Mahmoud A. E., Moeen S., Gerges M. K. Enhancing the Tunability Properties of Pure (Ba,Sr)TiO₃ Lead-Free Ferroelectric by Polar Nanoregion Contributions. J. of Materials Science: Materials in Electronics. 2021, vol. 32, no. 10, pp. 13248–13260. doi: 10.1007/s10854-021-05879-6

13. Nenasheva E. A., Kanareykin A. D., Dedyk A. I., Karmanenko S. F., Semenov A. S. High-Frequency Characteristics of (Ba,Sr)TiO₃ Tunable Ceramics with Various Additives Intended for Accelerator Physics. Integrated Ferroelectrics. 2005, vol. 70, no. 1, pp. 107-113. doi: 10.1080/10584580490895275

14. Ma X., Li S., He Y., Liu T., Xu Y. The Abnormal Increase of Tunability in Ferroelectric-Dielectric Composite Ceramics and Its Origin. J. of Alloys and Compounds. 2018, vol. 739, pp. 755-763. doi: 10.1016/ j.jallcom.2017.12.279

15. Zhang M., Zhai J., Shen Bo., Yao X. The Effect of Transition Metal Oxides on the Tunablility and Microwave Dielectric Properties of Ba0.5Sr0.5TiO3-BaWO4 Composite Ceramics. Materials Chemistry and Physics. 2011, vol. 128, no. 3, pp. 525-529. doi: 10.1016/ j.matchemphys.2011.03.043

Information about the authors

Andrey V. Tumarkin, Dr Sci. (Eng.) (2017), Associate Professor (2005), Professor of the Department of Physical Electronics and Technology of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 100

scientific publications. Area of expertise: technology and properties of functional materials. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: avtumarkin@yandex.ru

https://orcid.org/0000-0001-9858-3846

Evgeny N. Sapego, Postgraduate Student (2021), Researcher Assistant (2019) of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 15 scientific publications. Area of expertise: technology and properties of functional materials.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: ensapego@yandex.ru

https://orcid.org/0000-0002-1124-4081

Alexander G. Gagarin, Cand. Sci (Eng.) (2007), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Technology of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: application of ferroelectrics in SHF electronics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: aggagarin@etu.ru

https://orcid.org/0000-0001-5673-2372

Natalya G. Tyurnina, Cand. Sci (Chem.) (2009), Deputy Director for scientific work, Senior Researcher of the Institute of Silicate Chemistry of Russian Academy of Sciences. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: study of phase equilibria in silicate systems; synthesis of bioactive materials; research and analysis of the mechanism and kinetics of the formation of new materials in the process of ion exchange; study of physico-chemical and thermodynamic properties of synthesized materials; synthesis of new inorganic functional materials. Address: Institute of Silicate Chemistry of Russian Academy of Sciences, 2, Makarova emb., St Petersburg 199034, Russia E-mail: turnina.ng@iscras.ru

https://orcid.org/0000-0001-9410-8917

Zoya G. Tyurnina, Cand. Sci (Chem.) (2008), Senior Researcher of the Institute of Silicate Chemistry of Russian Academy of Sciences. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: study of thermodynamic properties; research of physico-chemical properties of glasses and melts; ion exchange treatment of glasses in molten salts; research and analysis of the mechanism and kinetics of the formation of porous glasses formed as a result of ion exchange between alkaline glass cations and salt melt cations; synthesis of new inorganic functional materials.

Address: Institute of Silicate Chemistry of Russian Academy of Sciences, 2, Makarova emb., St Petersburg 199034, Russia E-mail: turnina.zg@iscras.ru

https://orcid.org/0000-0003-3134-7309

Olga Yu. Sinelshchikova, Cand. Sci (Chem.) (2010), Senior Researcher of the Laboratory of Physico-Chemical Design and Synthesis of Functional Materials of the Institute of Silicate Chemistry of Russian Academy of Sciences. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: synthesis and properties of functional inorganic materials.

Address: Institute of Silicate Chemistry of Russian Academy of Sciences, 2, Makarova emb., St Petersburg 199034, Russia E-mail: sinelshikova@mail.ru

https://orcid.org/0000-0003-0207-8429

Sergey I. Sviridov, Dr Sci. (Chem.) (2001), Deputy Director for scientific work, Senior Researcher at the Institute of Silicate Chemistry of Russian Academy of Sciences. Author of more than 100 scientific publicastion. Area of expertise: diffusion and kinetics of interfacial interactions in oxide glasses; creation of protective coatings; synthesis of new inorganic functional materials.

Address: Institute of Silicate Chemistry of Russian Academy of Sciences, 2, Makarova emb., St Petersburg 199034, Russia E-mail: sviridov@iscras.ru

https://orcid.org/0000-0003-1085-8900

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 3. С. 96–117 Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 96–117

Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий УДК 004.932.4 https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-3-96-117

Оригинальная статья

Применение модели внешнего вида текстуры для сегментации легочных узлов при компьютерной томографии грудной клетки

Фаридоддин Шариати¹, В. А. Павлов ^{1,2⊠}, С. В. Завьялов ¹, Махди Оруджи³, Т. М. Первунина ²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия ² Национальный медицинский Исследовательский центр имени В. А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия ³ Калифорнийский университет, Дэйвис, США ⊠ pavlov_va@spbstu.ru

Аннотация

Введение. Рак легких ежегодно становится причиной более миллиона смертей во всем мире. Компьютерная диагностика (Computer-Aided Detection – CAD) является очень важным инструментом для идентификации поражений легких. В целом технологическую линию системы CAD можно разделить на четыре основных этапа: предварительную обработку, локализацию, извлечение признаков и классификацию. Поскольку для локализации при обработке медицинских изображений требуется сегментация, этот этап стал важной и сложной проблемой и было проведено много исследований новых методов сегментации.

Цель работы. Применение модели внешнего вида текстуры для сегментации легочных узлов при компьютерной томографии грудной клетки.

Материалы и методы. Предложена модель текстурного представления, которая является новым методом на основе модели и позволяет точно и эффективно сегментировать все типы узловых образований, включая околоплевральные узлы, не отделяя легкое от окружающей области при компьютерной томографии (КТ) легких. В этом методе текстурная репрезентация изображения получается с помощью алгоритмов выделения текстурных признаков.

Результаты. Предложенный метод был апробирован на 85 узелках из набора данных, полученных на базе иранской больницы Шариати. В этом обезличенном наборе сведений были представлены аннотации врачей и данные КТ. Результаты показывают, что предложенный алгоритм достигает среднего коэффициента сходства dice 84.75 %.

Заключение. Представлен новый алгоритм для сегментации узелков в легком, который может сегментировать все типы узелков с высокой производительностью. Этот алгоритм основан на модели и вместе с алгоритмом активного контура способен повысить точность и устранить ложные срабатывания за счет определения начальной маски. Результаты сегментации легочных узелков на нормальном КТ-изображении следующие: precision 85.5 %, dice 85 %, accuracy 96 % и specificity 98 %.

Ключевые слова: модель внешнего вида текстуры (ТАМ), извлечение признаков текстуры, система автоматизированного обнаружения (CADs), компьютерная томография (СТ), представление текстуры изображения (TRI)

Для цитирования: Применение модели внешнего вида текстуры для сегментации легочных узлов при компьютерной томографии грудной клетки / Фаридоддин Шариати, В. А. Павлов, С. В. Завьялов, Махди Оруджи, Т. М. Первунина // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 3. С. 96–117. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-96-117

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ННФИ в рамках научного проекта № 20-57-56018.

Благодарности. Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (www.scc.spbstu.ru).

Статья поступила в редакцию 11.03.2022; принята к публикации после рецензирования 15.04.2022; опубликована онлайн 28.06.2022

96

© Фаридоддин Шариати, Павлов В. А., Завьялов С. В., Махди Оруджи, Первунина Т. М., 2022



Medical Devices, Environment, Substances, Material and Product

Original article

Application of a Texture Appearance Model for Segmentation of Lung Nodules on Computed Tomography of the Chest

Faridoddin Shariaty¹, Vitalii A. Pavlov^{1,2⊠}, Sergey V. Zavjalov¹, Mahdi Orooji³, Tatiana M. Pervunina²

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St Petersburg, Russia

² Almazov National Medical Research Centre, St Petersburg, Russia

³ University of California, Davis, USA

⊠ pavlov_va@spbstu.ru

Abstract

Introduction. Lung cancer is one of the most critical diseases globally, with more than 1.6 million new cases registered every year. Early detection of lung cancer is essential; therefore, particular attention should be paid to the development of effective diagnostic and therapeutic procedures. Computer processing of CT scans in the course of lung cancer diagnostics involves the following stages: medical image acquisition, pre-processing of medical images, segmentation, and false-positive reduction. Since segmentation is an essential stage in the process of medical image analysis, the development of novel segmentation approaches is attracting much research interest. Model-based segmentation approaches have recently gained in popularity, largely due to their potential to restore lost information.

Aim. To apply a texture appearance model for the segmentation of pulmonary nodules on computed tomography of the chest. *Materials and methods.* A novel model-based Texture Appearance Model (TAM) is proposed for precise and effective segmentation of all sorts of nodule regions. We taught the TAM for segmentation of a lung nodule in lung CT images using a combination of extracted texture characteristics from CT scans and Texture Representation of Image (TRI).

Results. The results of applying the described TAM method to normal and noisy CT images are presented and compared to those obtained using the Region Growing and Active Contour algorithms, as well as the combination of Active Contour and Watershed algorithms. The TAM was tested in 85 nodules from a dataset, yielding an average dice similarity coefficient (DSC) of 84.75 percent.

Conclusion. A novel method for segmenting nodules in the lung, which is capable of segmenting all forms of nodules with excellent accuracy, is proposed. This model-based technique, when used with the active loop algorithm, can enhance accuracy and decrease false positives by selecting the initial mask. The precision, dice, accuracy, and specificity of lung nodule segmentation on a normal CT scan are 85.5, 85, 96, and 98, which levels are superior to those produced by the Active Contour, Region Growing and the combination of Active Contour and Watershed algorithms.

Keywords: Texture Appearance Model (TAM), Texture Feature Extraction, Computer-Aided Detection system (CADs), Computed Tomography scan (CT), Texture Representation of Image (TRI)

For citation: Faridoddin Shariaty, Pavlov V. A., Zavjalov S. V., Mahdi Orooji, Pervunina T. M. Application of a Texture Appearance Model for Segmentation of Lung Nodules on Computed Tomography of the Chest. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 96–117. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-96-117

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

Acknowledgements. The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research and National Science Foundation of the Islamic Republic of Iran as part of a scientific project N 20-57-56018. The results of the work were obtained using the computing resources of the supercomputer center of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (www.scc.spbstu.ru).

Submitted 22.03.2022; accepted 15.04.2022; published online 28.06.2022

Введение. Ежегодно в мире более чем у 1.6 млн пациентов диагностируется рак легких, что приводит более чем к одному миллиону смертей. В среднем 5-летняя выживаемость больных немелкоклеточным раком легкого (НМРЛ), который является наиболее распространенным типом рака легкого, составляет 15 % [1]. Рак легких на сегодняшний день является ведущей причиной смерти от рака в мире, на его долю приходится почти 25 % всех смертей от рака. Если рак легких обнаружен на ранних стадиях заболевания, когда узелок маленький и еще не успел распространиться, у него больше шансов на успешное лечение [2]. Современные клинические работы создают так много данных на одного пациента, что проанализировать всю информацию без компьютерных систем невозможно. Кроме того, анализ изображений и медицинской информации человеком имеет врожденную погрешность и может приводить к неправильной постановке диагноза [3]. Компьютерная система обнаружения (Computer-Aided Detection – CAD) является очень важным инструментом для диагностики поражений легких в медицинской визуализации.

В целом технологическую линию системы САD можно разделить на четыре основных этапа: предварительную обработку, сегментацию, извлечение признаков и классификацию. Сегментация изображений является сложной и важной проблемой в анализе медицинских изображений и компьютерном зрении. Отметим, что в последние годы было проведено много исследований новых методов сегментации. Однако в этой области остается несколько проблем, среди которых можно выделить эффективную, надежную и автоматическую сегментацию анатомии на радиологических изображениях [4]. Основная цель сегментации изображений заключается в сохранении целевой области при удалении нежелательных маммографических данных [5]. Сегментация легочных узелков на КТ-изображениях является сложной и основной задачей САD. Фактически многие методы количественной оценки легочных заболеваний автоматически требуют сегментации легочной паренхимы и узелков на этапе первичной обработки [6]. Методы сегментации можно разделить на несколько классов [7]: полностью основанные на изображении [8-10], основанные на модели [11] и гибридные методы [12]. Полностью основанные на изображении методы выполняют сегментацию, основываясь исключительно на информации, имеющейся в изображении. Морфологические операции [13], пороговое выделение, рост области [14], активные контуры [15], наборы уровней [16], водораздел [17] и нечеткая связь [18] являются примерами полностью основанных на изображении методов. Эти методы эффективно работают на изображениях. Однако высококачественных

иногда на поздней стадии рака легкого узелки, вероятно, расположены вблизи верхушки легкого, стенок, диафрагмы, кровеносных сосудов и т. д., где отсутствует легочная ткань, и информация о границах теряется. Эти несоответствия могут изменить результаты алгоритма сегментации, что приводит к низкой эффективности [19].

Основной причиной широкого использования компьютерных томографов является хорошая контрастность и видимость органов, однако наличие шума Гаусса снижает видимость объектов с низкой контрастностью на КТ-изображениях. Различение тканей с разной плотностью может быть ограничено в результате существующего случайного шума на медицинских изображениях. Шум соль/перец и спекл-шум возникают на изображениях КТ из-за деструктивной и конструктивной когерентной агрегации [8].

В последние годы подходы глубокого обучения также широко используются для сегментации узелков легких при компьютерной томографии. В [20] представили многоракурсную CNN (multi-view Convolutional Neural Network - MV-CNN) для сегментации легочных узелков, коэффициент кубизма алгоритма составил 77.67 %. В [21] авторы предложили синергетическую комбинацию глубокого обучения и наборов уровней, управляемых формой, для автоматической и точной сегментации узелка легкого. В [22] предложена система, которая эффективно сегментирует легочные узелки на КТ-сканах. Авторы рассмотрели систему в четырех основных модулях: обнаружение узла-кандидата с помощью Faster regional-CNN (FR-CNN), объединение кандидатов, уменьшение количества ложных срабатываний (FP) с помощью CNN и сегментация легочного узла с помощью полностью сверточной нейронной сети (FCN). Среднее значение коэффициента dice для сегментированного легочного узелка по сравнению с истиной составило 79 %. В [23] представили метод автоматизированной сегментации узлов легких на КТ-сканах с использованием графа-среза и предварительного глубокого обучения (Deep Learned prior based Graph Cut – DLGC). DLGC – это метод, который сочетает в себе глубокое обучение предварительной локализации элементов функцией стоимости, специфичной для данной области, используя данные изображений низкого уровня. Для твёрдых узелков DLGC получил среднюю оценку 0.69, 0.14 и для частичных солидных образований – 0.65, 0.13.

В последние годы алгоритмы сегментации на основе моделей становятся все более привлекательными. Если из изображения удалена информация, отсутствующие данные могут быть компенсированы за счет использования предыдущих в алгоритме на основе модели. Это является одним из преимуществ данного метода. Алгоритмы на основе моделей используют предыдущие данные о форме и очертаниях совокупности объектов, такие как статистические активные модели формы (Active Shape Modes – ASM) [24] и статистические активные модели внешнего вида (Active Appearance Models – AAM) [25]. Оба подхода основаны на создании модели распределения точек, которая принимает интересующую форму и затем резко усиливает ее вблизи ориентиров в случае ASM или текстуры объекта в случае ААМ [26]. ASM имеют ряд недостатков и ограничений: 1) удаляют информацию о внешнем виде объекта везде, кроме границы объекта; 2) на ASM не влияют модели текстуры и внешнего вида [4]. ААМ является одной из наиболее выдающихся методик [27], которая широко используется для извлечения признаков во многих приложениях [28], включая изучение поведения человека, моделирование лиц и задачи медицинской визуализации, такие как сегментация МРТ сердца или сегментация диафрагмы в данных КТ, а также регистрация в функциональной визуализации сердца [27]. В [29] авторы разработали алгоритм ААМ как основу для статистического моделирования изменения формы и текстуры объекта. ААМ включает (высокоуровневые) знания о текстуре (внешнем виде) и форме объекта и создает статистическую модель формы и внешнего вида каждого объекта.

В данной статье предложена модель внешнего вида текстуры (texture appearance model – TAM), которая представляет собой основанный на модели алгоритм, использующий извлечение текстурных признаков и выбор признаков для сегментации узелков легких на компьютерных томограммах. Насколько нам известно, данная работа представляет собой первую попытку использовать комбинацию извлеченных текстурных признаков из КТ-скана и сделать текстурное представление изображения (TRI) для использования в ТАМ для различения узелка легкого и легочной ткани на КТ-изображениях легких. В заключение представлены результаты применения данного алгоритма на нормальных и зашумленных КТ-изображениях. Затем результаты применения представленного алгоритма сравниваются с алгоритмами Region Growing [30], Active Contour [31] и комбинацией алгоритмов Active Contour и Watershed [8].

Модель внешнего вида текстуры (ТАМ). Алгоритм ТАМ включает следующие этапы:

- 1) извлечение признаков;
- 2) выбор признаков;
- 3) обучение модели.

1. Извлечение признаков является важным этапом в обработке изображений и распознавании образов. Признаки часто включают информацию о цвете, форме, текстуре или фоне [32]. Предлагаемый алгоритм извлечения признаков состоит из двух следующих признаков: радиомические признаки и признаки на основе текстуры. Методы радиомики извлекают огромное количество признаков из радиографических медицинских изображений с помощью алгоритмов характеризации данных. Текстурный признак используется для разделения и классификации изображений на области интереса. В изображении текстура предоставляет информацию о цветах и интенсивности. Географическое распределение уровней интенсивности в окрестности используется для характеристики текстуры.

В данной статье для статистического анализа тканей используется матрица совпадений на уровне серого (Gray-Level Co-Occurrence Matrix – GLCM). На рис. 1 показаны этапы извлечения признаков из входного изображения. В этом методе статистическая обработка выполняется над парой пикселей с заданной интенсивностью в пространственном соотношении для определения текстуры изображения и составления матрицы GLCM. В табл. 1 представлены основные признаки текстуры и формы, извлекаемые при КТ. Далее описываются извлеченные признаки.

Применение модели внешнего вида текстуры для сегментации легочных узлов при компьютерной томографии грудной клетки Application of a Texture Appearance Model for Segmentation of Lung Nodules on Computed Tomography of the Chest



Puc. 1. Извлечение признаков и сегментация изображения на входном КТ-скане грудной клетки *Fig. 1.* Feature extraction and image segmentation in an input CT scan of the chest

1.1. *Haralick*. В [33] для измерения пространственной связи между соседними пикселями в изображении предложили использовать матрицу совпадений уровня серого. Благодаря своей простоте и очевидной интерпретации текстурные признаки Haralick, которые вычисляются на основе GLCM, широко используются и были успешно применены в ряде приложений, включая анализ КТ легких [34]. В последние годы признаки Haralick приобрели популярность при анализе медицинских изображений, например ультразвуковых и МРТ-изображений печени и сердца [35], рентгеновской маммографии [36] и МРТ-изображений при исследовании рака молочной железы [37], рака простаты [38] и рака мозга [39]. Он также используется в радиомике [40], новой технике извлечения большого числа

Табл. 1. Извлеченные компьютером особенности формы и текстуры, которые будут использоваться для характеристики конкреций на компьютерной томограмме

Tab. 1.	Computer	extracted shap	pe and texture	features to	be used	for nodule	characterization	on CT

Признак	Биологическая основа и связь с морфологией поражения			
	Локализует области со значительными различиями интенсивности			
Статистика уровня серого (текстура)	внутри узла			
Управляеми й Габор (текстура)	Ориентированные текстуры через изменения направления и			
управляемый Габор (текстура)	масштаба захватывают микроархитектуры			
Haralick (Terrotypa)	Производные второго порядка, фиксирующие тонкие текстурные			
Tialallek (Tekerypa)	различия поражения			
Law (текстура)	Пятна, рябь, волнообразные проявления			
(homes)	Низкая частота: глобальная форма. Высокая частота: локальные			
Фурье (форма)	детали			
Явный дескриптор (форма)	Секулярность, угол наклона края, эффект ореола			

Применение модели внешнего вида текстуры для сегментации легочных узлов при компьютерной томографии грудной клетки Application of a Texture Appearance Model for Segmentation of Lung Nodules on Computed Tomography of the Chest

количественных данных из медицинских изображений и использования их для создания моделей, предсказывающих такие вещи, как фенотип опухоли [41], выживаемость [42] и категоризацию [43].

1.2. Gray. В [33] ввели признак текстуры серого, который является структурным признаком второго порядка, основанным на матрицах GLCM в соответствии с целевыми областями полутонового изображения. Контраст, корреляция, обратный момент разности, угловой второй момент и энтропия – пять признаков текстуры серого, восстановленных в данном исследовании. Для получения этих характеристик используются следующие математические формулы:

$$f = \sum_{ij=0}^{N-1} \left\{ P_{ij} \left(i - j \right) \right\}^2$$

- угловой второй момент;

$$f = \sum_{ij=0}^{N-1} P_{ij} (i - j)^2$$

– контраст;

$$f = \sum_{ij=0}^{N-1} P_{ij} \left[\frac{(i-\mu)(j-\mu_j)}{\sqrt{(\sigma_i)^2 (\sigma_j)^2}} \right]$$

- корреляция;

$$f = \sum_{ij=0}^{N-1} P_{ij} \left(-\ln P_{ij}\right)$$

– энтропия;

$$f = \sum_{ij=0}^{N-1} \frac{P_{ij}}{1 + (i-j)^2}$$

– обратный разностный момент, где f – выходные значения функций; P_{ij} – вероятность; i и j – индексы GLCM, извлеченные из изображения; μ – среднее значение; σ – стандартное отклонение.

1.3. Абсолютный градиент (Gradient – GRAD). Из каждой определенной градиентной матрицы КТ-скана был сформирован набор из пяти текстурных признаков. Среди них среднее значение, дисперсия, перекос, эксцесс и момент. После создания гистограммы (His) матрицы градиентов генерируются градиентные признаки. Гистограмма рассчитывается для значений градиента, которые попадают в диапазон [–255, 255].

Далее приведены характеристики градиента, которые были определены в [44]:

$$f = \sum_{v} \frac{\text{His}(v + 255)v}{N}$$

- среднее значение;

$$f = \sum_{v} \frac{\operatorname{His}(v+255)(v-\mu)^2}{N}$$

- отклонение;

$$f = \sum_{v} \frac{\text{His}(v+255)(v-\mu)^3}{N}$$

– перекос;

$$f = \sum_{v} \frac{\text{His}(v+255)(v-\mu)^4}{N}$$

- коэффициент эксцесса;

$$f = \sum_{v} \frac{\operatorname{His}(v+255)\sqrt{|v-\mu|}}{N}$$

– момент, где v – значение градиента, растянутое в диапазоне от –255 до 255; N – общее число пикселей.

1.4. Фильтр Габора [45] часто используется для извлечения текстурной информации из изображений. Согласно предыдущим работам [45], текстурные признаки Габора работают лучше, чем признаки древовидного вейвлетпреобразования (Tree-Structured Wavelet Transform - TWT), одновременной авторегрессионмногократного ной модели разрешения (Multiresolution Simultaneous Autoregressive Model – MR-SAR) и признаки пирамидного вейвлет-преобразования (Pyramid-Structured Wavelet Transform – PWT). В фильтрах Габора используются вейвлеты.

Свертка определяет вейвлет-преобразование Габора для входного изображения I(x, y) размером $P \times Q$:

$$G_{mn}(x, y) = \sum_{s} \sum_{t} I(x-s, y-t) \psi_{mn}^{*}(s, t),$$

где *m* и *n* – масштаб и ориентация вейвлета соответственно; *s* и *t* – параметры фильтра; ψ_{mn}^{*} –

Применение модели внешнего вида текстуры для сегментации легочных узлов при компьютерной томографии грудной клетки Application of a Texture Appearance Model for Segmentation of Lung Nodules on Computed Tomography of the Chest

комплексный ψ_{mn} , который использует вращение и расширение материнского вейвлета для построения серии сравнимых функций:

$$\psi_{m,n}(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \times \exp(j2\pi W x).$$

Здесь *W* – частота модуляции в этом уравнении, а Габор-подобные вейвлеты формируются с помощью следующей функции генерации:

$$\psi_{mn}(x,y) = a^{-m} \psi_{mn}(\tilde{x},\tilde{y}),$$

где a – фиксированный коэффициент; m и n обозначают масштаб и ориентацию вейвлета соответственно, так что m = 0, 1, ..., M-1; n = 0, 1, ..., N-1. В предположении, что a > 1 и $\theta = n\pi/N$, \tilde{x} и \tilde{y} определяются следующим образом:

$$\tilde{x} = a^{-m} (x \cos \theta + y \sin \theta);$$

$$\tilde{y} = a^{-m} (-x \cos \theta + y \sin \theta).$$

Далее перечислены переменные, используемые в данном исследовании:

$$a = \left(U_{h}/U_{l}\right)^{\frac{1}{M-1}};$$

$$W_{m,n} = a^{m}U_{l};$$

$$\sigma_{x,m,n} = \frac{(a+1)\sqrt{2\ln 2}}{2\pi a^{m}(a-1)U_{l}};$$

$$\sigma_{y,m,n} = \frac{1}{2\pi \operatorname{tg} \frac{\pi}{2N} \sqrt{\frac{U_{h}^{2}}{2\ln 2} - \left(\frac{1}{2\pi\sigma_{x,m,n}}\right)^{2}}}.$$

В нашей реализации используются следующие константы, которые также распространены в литературе: размер маски фильтра 60×60 , при этом $U_l = 0.05$; $U_h = 0.4$; *s* и *t* варьируются от 0 до 60.

1.5. Локальный бинарный шаблон (Local Binary Patterns – LBP) [46] рассчитывается путем сравнения одного пикселя с его соседями:

LBP_{Q,R} =
$$\sum_{p=0}^{Q-1} s(g_q - g_c) 2^q$$
;
 $s(x) = \begin{cases} 1, x > 0; \\ 0, x < 0, \end{cases}$

где Q – общее количество задействованных соседей; R – радиус окрестности; g_c – значение серого центрального пикселя; g_q – значение его соседей. Если g_c имеет координаты (0, 0), то g_q имеет координаты $(R\cos(2\pi q/Q), R\sin(2\pi q/Q))$. Значения серого соседей, которые не находятся в сетке изображения, могут быть аппроксимированы с помощью интерполяции. Предполагается, что изображение имеет размер $I \times J$. После обнаружения шаблона LBP каждого пикселя строится гистограмма для представления изображения текстуры:

$$H(k) = \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} f \left[\text{LBP}_{Q,R}(i,j), k \right]; k \in [0,K];$$
$$f(x,y) = \begin{cases} 1, & x = y; \\ 0, \text{ otherwise.} \end{cases}$$

Максимальное значение шаблона LBP равно К. Значение U шаблона LBP представляет собой количество пространственных переходов (побитовые изменения 0/1):

$$U(LBP_{Q,R}) = |s(g_{Q-1} - g_c) - s(g_0 - g_c)| + \sum_{q=1}^{Q-1} |s(g_q - g_c) - s(g_{q-1} - g_c)|.$$

Равномерные паттерны LBP связаны с паттернами с ограниченным переходом или разрывами $(U \le 2)$ в круговом бинарном представлении. На практике для преобразования LBP_{Q,R} в

LBP $_{Q,R}^{u_2}$ (верхний индекс u_2 указывает однородные шаблоны с $U \le 2$) используется таблица поиска 2Q элементов с $Q \times (Q-1) + 3$ различных выходных значений.

Чтобы получить инвариантность к вращению, локально инвариантный к вращению шаблон можно определить следующим образом:

$$LBP_{Q,R}^{riu_2} = \begin{cases} \sum_{q=0}^{Q-1} s(g_q - g_c), U(LBP_{Q,R}) \le 2; \\ Q+1, \text{ otherwise.} \end{cases}$$

Чтобы преобразовать $LBP_{Q,R}$ в $LBP_{Q,R}^{riu_2}$ (верхний индекс riu₂ (rotational invariance) указывает инвариантные к вращению "однородные"

102

Применение модели внешнего вида текстуры для сегментации легочных узлов при компьютерной томографии грудной клетки

Application of a Texture Appearance Model for Segmentation of Lung Nodules on Computed Tomography of the Chest шаблоны с $U \le 2$), который имеет Q + 2 различных выходных значений, можно использовать таблицу поиска.

2. Выбор признаков. Если ω_1 и ω_2 – это два класса, которые в работе предназначены для определения пикселей с узлами и без узлов соответственно, а **х** – это вектор признаков, выбираем ω_1 , если

 $P(\omega_1 \mid \mathbf{x}) > P(\omega_2 \mid \mathbf{x}),$

вероятность ошибки зависит от разности $P(\omega_1 | \mathbf{x})$ и $P(\omega_2 | \mathbf{x})$. Таким образом, отношение $P(\omega_1 | \mathbf{x}) / P(\omega_2 | \mathbf{x})$ содержит полезные данные в области дискриминационных возможностей, связанных с принятым вектором признаков \mathbf{x} , относительно классов ω_1 и ω_2 . С другой стороны (для существующих значений $P(\omega_1 | \mathbf{x})$ и $P(\omega_2 | \mathbf{x})$), $\ln \left[P(\omega_1 | \mathbf{x}) / P(\omega_2 | \mathbf{x}) \right] = D_{12}(\mathbf{x})$ также содержит ту же информацию и полезен для измерения базовой информации различения класса ω_1 относительно ω_2 . Логически $D_{12} = 0$ означает, что классы полностью перекрываются. Поскольку \mathbf{x} не является постоянным значением, рассматривается среднее значение по классу ω_1 :

$$D_{12} = \int_{-\infty}^{\infty} P(x | \omega_1) \ln \left[\frac{P(x | \omega_1)}{P(x | \omega_2)} \right] dx;$$

для класса ω₂ также имеются аналогичные рассуждения:

$$D_{21} = \int_{-\infty}^{\infty} P(x | \omega_2) \ln \left[\frac{P(x | \omega_2)}{P(x | \omega_1)} \right] dx,$$

сумма:

$$d_{12} = D_{12} + D_{21}. \tag{1}$$

Выявляются следующие свойства дивергенции:

$$d_{ij} \ge 0;$$

 $d_{ij} = 0, \text{ если } i = j;$
 $d_{ij} = d_{ji}.$

Формулу (1) можно использовать в качестве меры разделимости для классов ω_1 и ω_2 относительно **x** (принятый вектор признаков), который известен как дивергенция. Все критерии, с которыми мы имели дело до сих пор, измеряют способность классификации в отношении задачи двух классов. В мультиклассовой настройке C(k) вычисляет форму среднего или "общего" значения. Для каждой пары классов использовалась и вычислялась одномерная дивергенция d_{ij} из [47]. Затем для каждой функции соответствующий C(k) был установлен равным:

$$C(k) = \min_{i,j} d_{i,j}$$

Вместо среднего значения C(k) представляет собой наименьшее значение расхождения по всем парам классов. Таким образом, чтобы идентифицировать признаки с наилучшей способностью разделимости класса "наихудшего случая", необходимо использовать самые высокие значения C(k). Работа с признаками по отдельности дает значительное преимущество с точки зрения простоты вычислений. Однако такие методы не учитывают существующие отношения между признаками.

Рассмотрим x_{nk} как *k*-й признак *n*-го шаблона с n = 1, 2, ..., N и k = 1, 2, ..., m. Коэффициент взаимной корреляции между любыми двумя из них определяется выражением

$$\rho_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^{N} x_{ni} x_{nj}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N} x_{ni}^2 \sum_{n=1}^{N} x_{nj}^2}}.$$
 (2)

Можно продемонстрировать $|\rho_{ij}| \le 1$. Этапы, из которых состоит процедура отбора, следующие:

1) выбор критерия отделимости класса C и вычисление его значения для всех заданных признаков x_k ; k = 1, 2, ..., m. Затем результаты должны быть отсортированы в порядке возрастания, при этом лучшая функция получает наивысшее значение C. Другими словами, это x_{i1} ;

2) чтобы выбрать второй признак, вычисляют коэффициент взаимной корреляции, определенный в (2) между выбранным x_{i1} и всеми оставшимися m-1 признаками, т. е. ρ_{ij} , $j \neq i_l$;

3) выбор функции *x*_{*i*2}, для которой

.....

Применение модели внешнего вида текстуры для сегментации легочных узлов при компьютерной томографии грудной клетки Application of a Texture Appearance Model for Segmentation of Lung Nodules on Computed Tomography of the Chest

$$i_2 = \arg \max_j \left\{ \alpha_1 C(j) - \alpha_2 \left| \rho_{i_1 j} \right| \right\}; \ j \neq i_1,$$

где α_1 и α_2 определяют важность относительных или весовых коэффициентов, равных единице в данной работе. На практике для выбора следующего признака помимо меры отделимости класса С учитывается корреляция с ранее заданным признаком, после чего результаты обобщаются для k-го шага;

4) выбор *x_{ik}*; *k* = 3, ..., *l* так, чтобы:

$$i_k = \arg \max_j \left\{ \alpha_1 C(j) - \frac{\alpha_2}{k-1} \sum_{r=1}^{k-1} |\rho_{i_r j}| \right\}, j \neq i_1. (3)$$

В (3) r = 1, 2, ..., k - 1. Также учитывалась средняя корреляция между всеми ранее выбранными признаками.

3. Модель обучения:

3.1. Конструкция модели. Статистические модели формы и текстуры (внешнего вида) делаются независимыми на основе выборок сегментации (обучающих данных) совокупности объектов, затем модели объединяются в единый ТАМ.

Моделирование формы: форма моделируется путем создания модели распределения x_s на основе ориентиров. Формы выравниваются в общую систему координат с помощью анализа Прокруста. Статистическая модель изменения формы может быть создана с использованием PCA (Principal Component Analysis) по контрольным точкам каждого N набора обучающих данных. Следующая линейная модель дает примеры изученного класса формы:

$$x = \overline{x} + \Omega_s b_s, \tag{4}$$

где \overline{x} – среднее значение формы; Ω_s – специальная векторная матрица формы; b_s – параметр формы.

Моделирование текстуры: в конце преобразования изображений в градациях серого к средней форме с помощью схемы выборки сгенерирован вектор текстуры g для каждого экземпляра обучения. Нормирование интенсивности выполняется с умеренной интенсивностью 0 и дисперсией 1. Использование РСА в линейной модели нормальных данных для вектора интенсивности g может быть получено

$$g = \overline{g} + \Omega_g b_g$$

где g – матрица собственного вектора интенсивности; \overline{g} – средняя интенсивность; Ω_g – матрица собственных векторов интенсивности; *b*_g – параметры интенсивности.

Комбинация формы и текстуры: для построения окончательной модели вектор коэффициентов формы **b**_s и вектор коэффициентов интенсивности уровня серого **b**_g соединяются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} W_{s}\mathbf{b}_{s} \\ \mathbf{b}_{g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{s}\Omega_{s}^{\mathrm{T}}(x-\overline{x}) \\ \Omega_{g}^{\mathrm{T}}(g-\overline{g}) \end{bmatrix},$$

где W_s – диагональная матрица, относящаяся к различным единицам формы и интенсивности. Использование РСА для применения к выборке всех векторов **b** и представляет модель:

$$\mathbf{b} = \Omega_{\mathbf{c}} C = \begin{bmatrix} \Omega_{\mathbf{c},s} \\ \Omega_{\mathbf{c},g} \end{bmatrix} C, \tag{5}$$

где Ω_{c} – матрица собственных векторов; C – результат коэффициентов модели внешнего вида.

3.2. Адаптация модели. ТАМ можно использовать для сегментации с помощью метода градиентного спуска. Параметры модели с и знак t определяют реальную форму в целевом кадре изображения. Пиксели, покрытые формой модели, преобразуются в рамку модели текстуры, чтобы соответствовать им. Этого можно добиться путем выборки пикселей по вектору интенсивности \mathbf{g}_{im} и применения $B_u^{(-1)}$, в результате чего в кадре модели появится вектор интенсивности g_{im}.

Формулу (3) можно использовать для вычисления истинного значения уровня серого для модели g_{mo} (текстура текущей модели) из с. В процессе сопоставления остаточная L2 -норма (the quadratic error measure) в (5) уменьшается путем корректировки вектора параметров в следующем выражении, которое состоит из параметров модели c, знака t и глобальных параметров интенсивности и:

$$r(p) = g_{\rm im}(p) - g_{\rm mo}(p) = = B_u^{-1} [g_{\rm im}(p)] - g_{\rm mo}(p);$$
(6)

$$P^{\mathrm{T}} = \left(c^{\mathrm{T}} \left| t^{\mathrm{T}} \right| u^{\mathrm{T}} \right).$$
 (7)

Предполагается, что линейная зависимость между наблюдаемым оставшимся r(p) и корректировкой параметра δ_p минимизирует ошибку при обновлении вектора параметров **Р** во время сопоставления. Методом самообучения изучается (7). В результате *R* рассматривается как константа, и пересчет на каждом шаге сопоставления избегается:

$$\delta_p = -Rr(p);$$
 $R = \left[J(r)^T J(r)\right]^{-1} J(r)^T$
где $J(r) = \frac{\delta r}{\delta p}$ – якобиан *r*.

ТАМ сопоставляется с целевым изображением путем повторения шагов 5–8 до тех пор, пока ошибка $||r||^2$ не уменьшится:

1) первоначально необходимо оценить все компоненты вектора параметров \mathbf{p}_0 : параметры модели c_0 (например, "средняя модель": $c_0 = 0$), параметры позы t_0 и параметры текстуры u_0 . Установить $p = p_0$;

2) оценка остаточного вектора г (см. (6));

- 3) вычисление текущей ошибки $E = ||r||^2$;
- 4) установка k = 1;

5) обновление вектора параметров: $\overline{\mathbf{p}} = p + k\delta p = p - kRr;$

6) вычисление нового вектора ошибки $\overline{\mathbf{r}}$ с помощью обновленного вектора параметров $\overline{\mathbf{p}}$;

7) если $(\|\overline{r}\|)^2 \leq E$, то принимаются новые параметры: $p = \overline{p}$;

8) в противном случае необходимо пробовать k = 1.5; k = 0.5; k = 0.25 и т. д. и переходить к шагу 5.

Методы. Классы легочных узлов. Легкие представляют собой сложные органы с различными структурами, такими как щели, артерии, бронхи или плевра, которые могут прилегать к легочному узлу на трехмерной компьютерной томограмме. Узел в легком представляет собой каплеобразный объект типичной сфероидальной/эллипсоидальной формы с более светлыми пикселями, чем фон (легкие). В легких есть множество элементов разного размера, таких как бронхи и кровеносные вены, и их близость к узлам может иногда мешать обнаружению узлов и препятствовать их сегментации. Узелки делятся на четыре типа в зависимости от их расположения и отношения к окружающим структурам легкого (рис. 2): а – хорошо очерченные узелки: связи между этими узелками и другими легочными структурами нет; δ – околососудистый узел: узел, расположенный рядом с сосудом, имеющий соединение с сосудом; в – с плевральным хвостом: узелки у стенки легкого, имеющие тонкое соединение со стенкой плевры. Плевральный хвост является частью узла. Это означает, что область сегментации должна включать этот хвост. В отличие от околососудистых узлов, неузелковую структуру нельзя вырезать, чтобы избежать недооценки фактического объема узла; г – околоплевральный узел: значительная часть поверхности околоплеврального узла прилегает к плевральной стенке. Из-за взаимосвязи между узлом и неузловой структурой и геометрической формы окружающей неузловой структуры



Рис. 2. Типы узелков в легких: *a* – хорошо очерченный узел; *б* – околососудистый узел;
 в – узелки с плевральным хвостом; *г* – околоплевральный узел
 Fig. 2. Lung nodule types: *a* – a well-defined nodule; *б* – a juxta-vascular nodule; *в* – nodules with pleural tail;
 г – a juxta-pleural nodule

Применение модели внешнего вида текстуры для сегментации легочных узлов при компьютерной томографии грудной клетки Application of a Texture Appearance Model for Segmentation of Lung Nodules on Computed Tomography of the Chest



Puc. 3. Предлагаемая архитектура алгоритма *Fig. 3.* Proposed algorithm architecture

околососудистые узелки отличаются от околоплевральных узелков.

Сосуд может выглядеть как сферическая структура с трубчатой формой в структуре КТ. Плотность структуры легких и вен на КТ-изображении вполне сопоставима, и для их понимания требуются медицинские знания анатомии легких, включая расположение, форму, размер и связи между структурами легких. Алгоритм ТАМ предлагается в этой статье для эффективной сегментации всех видов упомянутых узелков.

Вычислительная стратегия. Реализация алгоритма ТАМ состоит из следующих основных этапов (рис. 3): извлечение признаков текстуры, выбор признаков, обучение модели внешнего вида текстуры и применение обученной модели к КТ-изображениям. В части обучения модель изучается с использованием изображений КТ и сегментации узлов, которые были выполнены врачами. Затем, чтобы проверить эффективность алгоритма, обученная модель применяется к входным КТ-изображениям, и результат сегментации сравнивается с результатом врачей. Этапы алгоритма обучения и применения рассматриваются следующим образом:

 выбор области интереса: оператор выбирает интересующий узел на спиральных КТизображениях, используя пользовательский компьютерный интерфейс. Размер этой области составляет 50 × 50 пикселей, который затем будет изменен до 200 × 200 пикселей для дальнейшей обработки;

2) извлечение признаков текстуры: из области изменения размера извлекаются 129 различных текстурных и радиомических характеристик, включая Haralick, Grey, Grad, Gabor и LBP.

Выбор признака и создание TRI. Как указано, метод выбора выполняется с использованием следующих шагов:

1. На основе выбранного класса вычисляется критерий C для существующих признаков x_k ; k = 1, 2, ..., 129. Затем результат следует ранжировать по убыванию и выбрать лучший признак с более высоким C. Можно сказать, что это x_{i1} .

2. Второй признак должен быть выбран относительно коэффициента взаимной корреляции, который определен в (4) между каждым из оставшихся 128 признаков, и выбранным x_{i1}.

3. Выбор функции x_{i2}, для которой

$$i_{2} = \arg\max_{i} \left\{ \alpha_{1} C(j) - \alpha_{2} \left| \rho_{i_{1} j} \right| \right\}; j \neq i_{1}.$$

4. Выбор функции x_{i3}, для которой

$$i_{3} = \arg \max_{j} \left\{ \alpha_{1} C(j) - \frac{\alpha_{2}}{2} \left| \rho_{i_{1}j} \right| - \frac{\alpha_{2}}{2} \left| \rho_{i_{2}j} \right| \right\},\$$

где α_1 , α_2 определяют относительную важность или вес. Здесь считается $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$. Другими словами, при выборе следующего признака учитывалась не только мера отделимости класса C, но и корреляция с предыдущим признаком. В результате этого раздела из 129 текстурных признаков, извлеченных из легочного узла, были выбраны 3 лучших признака с высокой производительностью для создания текстурного представления изображения (TRI). Выбранными признаками являются Харалик, Грей и Лоу (рис. 4).



Извлечение Выбор трех Создание TRI признаков структуры лучших признаков

Puc. 4. Предлагаемая архитектура алгоритма *Fig. 4.* Proposed algorithm architecture

Обучение модели включает следующие шаги:

1. Создание TRI: на основе 3 лучших признаков, создается RGB-изображение, в котором слой R является первым выбранным элементом, G и B – вторым и третьим признаками (рис. 4).

2. Выбор ориентира: для обучения ТАМ необходимо определить ориентиры в обучающих данных. Изучение надежного и точного метода автономного обнаружения ориентиров – сложная задача, которая имеет решающее значение для повышения точности алгоритма.

3. Обучение ТАМ. Модель обучена со следующими параметрами: количество точек контура, интерполированных между основными ориентирами, равно 80, размер текстуры внешнего вида как количество исходного изображения равен единице, количество масштабов изображения равно четырем, а количество итераций поиска равно 60. Для обучения ТАМ используются 50 TRI легочных узелков.

Применение обученной модели. Применение алгоритма состоит из четырех основных шагов:

1. Выбор и изменение размера области интереса: используя специализированный компьютерный пользовательский интерфейс, оператор сначала выбирает интересующий узел на спиральных КТ-изображениях. Размер этой области составляет 50 × 50 пикселей, который затем будет изменен до 200 × 200 пикселей для дальнейшей обработки.

2. Извлечение признаков: 3 лучших признака, определенных на этапе обучения, извлекаются из области с измененным размером, включая Харалик, Грей, Лоу.

3. Создание начальной маски с использованием алгоритма Active Contour: чтобы начать применять изученную модель, модель с использованием изученных данных предлагает начальное приближение – ориентир для начала поиска узелка. В этой работе с использованием метода активного контура создается начальная маска узла, которая будет использоваться в качестве исходного ориентира для начала применения TAM.

4. Применение изученной модели: используются изученные параметры и начальная маска, созданная методом активного контура; исходная маска должна совпадать с областью узла при нажатии пользователем, после чего запускается алгоритм и выполняется поиск точной области узла.

Экспериментальные результаты. База данных. В экспериментах исследовали компьютерные томограммы легких из госпиталя Шариати (Иран). В этом исследовании использовался набор данных из 85 КТ-изображений с узлами в легких. Количество срезов на КТ-изображениях колебалось от 214 до 352, а толщина срезов составляла 1.5 мм. Пространственное разрешение X-Y составляет 0.8850 ± 0.062 мм/пиксель (среднее значение ± стандартное отклонение). Изображения КТ получают с помощью томографа "Сименс" с максимальным рабочим напряжением трубки до 120...140 кВ и током в диапазоне от 25 до 40 мА/с в зависимости от состояния пациента. Каждый срез имел планарное разрешение XY 512 × 512 пикселей и 16-битное разрешение по шкале серого в единицах Хаунсфилда (HU).

Оценка модели. Оценка Dice (или F-оценка), точность, отзыв (или чувствительность), специфичность, частота ошибок, точность и частота ложных открытий (FDR) используются в данной статье для представления производительности предлагаемого алгоритма TAM.

Применение модели внешнего вида текстуры для сегментации легочных узлов при компьютерной томографии грудной клетки Application of a Texture Appearance Model for Segmentation of Lung Nodules on Computed Tomography of the Chest

По уравнению

Dice =
$$\frac{2|e \cap g|}{|e|+|g|}$$
,

где *е* – площадь сегментированного узла на медицинском снимке с использованием компьютерных методов; *g* – площадь сегментированного узла по оценке врача-эксперта.

Кроме того, авторы использовали точность, чувствительность и специфичность для определения производительности этих алгоритмов:

Точность =
$$\frac{TP + TN}{TP + FP + FN}$$
;
Чувствительность = $\frac{TP}{TP + FN}$;
Специфичность = $\frac{TN}{TN + FP}$,

где TP – истинно положительное решение, которое принимает алгоритм; TN – истинно отрицательное решение; FP – ложноположительное решение; FN – ложноотрицательное решение.

Результат алгоритма. В клинических данных получение надежных данных для определения узловых границ является сложной задачей.

В табл. 2 представлены средние результаты предложенного алгоритма сегментации на 85 пациентах. Этот алгоритм также был реализован для изображений, содержащих гауссовский и спекл-шум. Сравнив результаты, можно считать, что алгоритм обладает высокой стабильностью при наличии различных шумов. На рис. 5 показано визуальное сравнение работы алгоритма и сегментации врачом-специалистом. Это сравнение свидетельствует о том, что предложенный алгоритм ТАМ, согласно вышеизложенному, обладает высокой устойчивостью на зашумленных изображениях и в случае удаления части изображения дает приемлемые результаты при сегментации.

На рис. 6 показаны результаты алгоритма по узлам в зависимости от их расположения в легких. Можно сделать вывод, что предложенный алгоритм обладает хорошей способностью отделять прикрепившийся к стенке легкого узел. Сле-

Табл. 2. Результаты использования ТАМ *Таb. 2.* ТАМ performance

Т	Duralation	C	C	Emer Dete	D:	A	EDD
ТИП	Precision	Sensitivity	specificity	Error Kale	Dice	Accuracy	FDK
Без шума	86.56	97.84	88.25	88.24	84.75	96.27	13.375
Гауссовский шум	81.84	83.52	97.46	88.53	82.51	96.07	18.07
Спекл-шум	90.92	65.61	98.9	88.46	75.92	95.38	9



Рис. 5. Визуальные характеристики ТАМ по сравнению с сегментацией врачом (красная область – результат алгоритмов, а белая область – результат работы врачей): *а* – нормальная КТ; *б* – КТ с гауссовским шумом; *в* – КТ-сканирование со спекл-шумом

Fig. 5. TAM visual performance compared to segmentation by physicians (red area – obtained by algorithms and white area – obtained by physicians): a – normal CT scan; δ – CT scan with Gaussian noise; e – CT scan with Speckle noise


Puc. 6. Результаты алгоритма ТАМ для узелков в соответствии с их расположением в легких *Fig. 6.* ТАМ performance in nodule segmentation with respect to their location in the lungs

дует отметить, что при использовании предложенного алгоритма выделения узелков, прикрепленных к стенке легкого, нет необходимости отделять легкие от окружающих тканей. Однако, если используются алгоритмы Active Contour или Region Growing, для отделения узелков, прикрепленных к стенке легкого, сначала необходимо использовать алгоритм разделения легких, который может обнаруживать прикрепленные узелки.

Обсуждение. Как уже упоминалось, в последние годы возрос интерес к методам сегментации на основе моделей. Одним из преимуществ этих методов является то, что даже при потере некоторой информации об объекте такие пробелы можно заполнить, используя предыдущую информацию в модели. В этом разделе изучается производительность алгоритма TAM, Active Contour, Region Growing и комбинации алгоритмов Active Contour и Watershed. В табл. 3 представлены результаты реализации и тестирования этих четырех алгоритмов на компьютерных томограммах легких. Согласно представленным результатам, предложенный алгоритм имеет лучшую производительность для сегментации узелков и более низкую частоту ложных срабатываний, что означает приемлемую стабильность алгоритма. Из-за близости комбинации алгоритмов Active Contour и Watershed на следующем этапе производительность этих четырех алгоритмов пересматривается путем добавления шума Гаусса и мультипликативного спекл-шума к КТ (табл. 3).

По полученным результатам, представленным в табл. 3, можно сделать вывод, что предложенный алгоритм на основе модели обладает устойчивостью к шуму. Устойчивость к шуму очень важна в алгоритмах сегментации, поскольку оценка объема опухоли и сегментация воспроизводимых и точных границ в медицинских изображениях важны для диагностики, определения стадии и оценки ответа на терапию рака. На рис. 7 показано видимое сравнение

Табл. 3. Оценка Dice реализации четырех алгоритмов сегментации в нормальной ситуации и при наличии шума

Tab. 3. Dice score characterizing the implementations of four segmentation algorithms under normal conditions and in the presence of noise

Dice	Active Contour	Region Growing	Watershed and Active Contour	TAM
Обычный	76.25	79.85	83.57	84.75
С гауссовским шумом (σ = 0.05)	46.42	35.84	59.71	82.51
Со спекл-шумом (σ = 0.07)	45.44	36.28	67.42	75.92

Применение модели внешнего вида текстуры для сегментации легочных узлов при компьютерной томографии грудной клетки Application of a Texture Appearance Model for Segmentation of Lung Nodules on Computed Tomography of the Chest



Fig. 7. Comparison of the segmentation area obtained by segmentation algorithms in the presence of Speckle noise (red area – obtained by algorithms and white area – obtained by physicians): a – TAM algorithm; δ – active contour and watershed; s – growing region; e – active contour

производительности этих четырех алгоритмов по отношению к удельному шуму, из которого можно сделать вывод, что алгоритм, представленный в статье, гораздо более устойчив к шуму.

Следующее сравнение между этими четырьмя алгоритмами проводится таким образом, чтобы исследовать точность алгоритмов сегментации узла в зависимости от местоположения узла в легком (рис. 8). Поскольку алгоритмы, полностью основанные на изображениях, не имеют возможности сегментировать узелки, прикрепленные к стенке легкого, перед использованием этих алгоритмов необходимо отделить легкое от окружающей области. Однако для отделения узелков, прикрепленных к стенке легкого, по представленному в статье алгоритму нет необходимости отделять легкое от окружающей области. Поэтому результаты отделения конкреций, прикрепленных к стене, по



Puc. 8. Сравнение производительности и стандартного отклонения алгоритмов сегментации *Fig. 8.* Comparison of the performance and standard deviation of segmentation algorithms

Применение модели внешнего вида текстуры для сегментации легочных узлов при компьютерной томографии грудной клетки Application of a Texture Appearance Model for Segmentation

of Lung Nodules on Computed Tomography of the Chest

этому алгоритму практически не уступают другим алгоритмам.

Согласно рис. 8, критерий Dice предлагаемого алгоритма выше, чем у других алгоритмов, однако критерий Dice во всех алгоритмах находится практически в одном диапазоне. Но существует большая разница в критерии частоты ложных открытий, т. е. представленный алгоритм на основе модели имеет минимальный критерий, который показывает мощность алгоритма в точной сегментации узелков. Кроме того, стандартное отклонение показателей сегментации на рис. 8 показывает, что предлагаемый метод обладает большей стабильностью при сегментации различных видов узлов.

Заключение. В статье представлен новый алгоритм для сегментации узелков в легком, который может сегментировать все типы узелков с вы-

сокой производительностью. Этот алгоритм основан на модели и вместе с алгоритмом активного контура способен повысить точность и устранить ложные срабатывания за счет определения начальной маски. Результаты сегментации легочных узелков на нормальном КТ-изображении следующие: precision 85.5, dice 85, accuracy 96 и specificity 98, что лучше, чем у алгоритма активного контура, алгоритма Region Growing и комбинации алгоритмов активного контура и Watershed. Кроме того, при наличии шума предложенный алгоритм получил следующий результат: precision 86, dice 80, accuracy 96 и specificity 98, что превосходит другие модели. Результаты работы показывают, что предложенный метод повышает точность деления узелков в легком и может помочь радиологам в интерпретации КТ-изображений, особенно для количественного анализа легкого.

Авторский вклад

Шариати Фаридоддин – анализ литературы, написание статьи. Павлов Виталий Александрович – анализ литературы, написание статьи. Завьялов Сергей Викторович – анализ результатов. Махди Оруджи – разработка алгоритма анализа данных, сбор данных. Первунина Татьяна Михайловна – сбор данных.

Author's contribution

Shariati Faridoddin, analyzed the literature, wrote the paper.
Vitalii A. Pavlov, analyzed the literature, wrote the paper.
Sergey V. Zavyalov, analyzed the results.
Mahdi Orooji, invented and developed a data analysis algorithm, collected data.
Tatyana M. Pervunina, collected data.

Список литературы

1. Texture appearance model, a new model-based segmentation paradigm, application on the segmentation of lung nodule in the CT scan of the chest / F. Shariaty, M. Orooji, E. N. Velichko, S. V. Zavjalov // Computers in biology and medicine. 2021. Vol. 140. P. 105086. doi: 10.1016/j.compbiomed.2021.105086

2. Shariaty F., Mousavi M. Application of CAD systems for the automatic detection of lung nodules // Informatics in Medicine Unlocked. 2019. Vol. 15. P. 100173. doi: 10.1016/j.imu.2019.100173

3. Radiomics-based prognosis analysis for non-small cell lung cancer / Y. Zhang, A. Oikonomou, A. Wong, M. A. Haider, F. Khalvati // Scientific reports. 2017. Vol. 7, № 1. P. 1–8. doi: 10.1038/srep46349

4. HOSVD-based 3D active appearance model: segmentation of lung fields in CT images / Q. Wang, W. Kang, H. Hu, B. Wang // J. of Medical Systems. 2016. Vol. 40, № 7. P. 1–11. doi: 10.1007/s10916-016-0535-0 5. Cetin M., Iskurt A. An automatic 3-d reconstruction of coronary arteries by stereopsis // J. of medical systems. 2016. Vol. 40, N $_{2}$ 4. P. 1–11. doi: 10.1007/s10916-016-0455-z

6. Automatic lung segmentation in computed tomography images using active shape model / F. Shariaty, M. Orooji, M. Mousavi, M. Baranov, E. Velichko // 2020 IEEE Intern. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), St Petersburg, Russia, 15–16 Oct. 2020. Piscataway: IEEE, 2020. P. 156–159. doi: 10.1109/EExPolytech50912.2020.9243982

7. Medical image segmentation by combining graph cuts and oriented active appearance models / X. Chen, J. K. Udupa, U. Bagci, Y. Zhuge, J. Yao // IEEE transactions on image processing. 2012. Vol. 21, № 4. P. 2035– 2046. doi: 10.1109/TIP.2012.2186306

8. The performance of active-contour and region growing methods against noises in the segmentation of computed-tomography scans / M. Mousavi, F. Shariaty,

Применение модели внешнего вида текстуры для сегментации легочных узлов при компьютерной томографии грудной клетки Application of a Texture Appearance Model for Segmentation of Lung Nodules on Computed Tomography of the Chest M. Orooji, E. Velichko // Book Chapter in Intern. Youth Conf. on Electronics, Telecommunications and Information Technologies. Springer, 2021. P. 573–582. doi: 10.1007/978-3-030-58868-7_63

9. Automated pulmonary nodule detection system in computed tomography images based on Active-contour and SVM classification algorithm / F. Shariaty, V. Davydov, V. Yushkova, A. Glinushkin, V. Y. Rud // J. of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1410, № 1. P. 012075. doi: 10.1088/1742-6596/1410/1/012075

10. Shariaty F., Hosseinlou S., Rud V. Y. Automatic lung segmentation method in computed tomography scans // J. of Physics: Conf. Series, 2019. Vol. 1236, № 1. P. 012028. doi: 10.1088/1742-6596/1236/1/012028

11. Abdulameer M. H., Sheikh Abdullah S. N. H., Othman Z. A. A modified active appearance model based on an adaptive artificial bee colony // The Scientific World J. 2014. Vol. 2014. P. 1–16. doi: 10.1155/2014/879031

12. Automatic segmentation of thoracic and pelvic CT images for radiotherapy planning using implicit anatomic knowledge and organ-specific segmentation strategies / B. Haas, T. Coradi, M. Scholz, P. Kunz, M. Huber, U. Oppitz, L. André, V. Lengkeek, D. Huyskens, A. van Esch, R. Reddick // Physics in Medicine & Biology. 2008. Vol. 53, № 6. P. 1751–1771. doi: 10.1088/0031-9155/53/6/017

13. A new hybrid approach using fuzzy clustering and morphological operations for lung segmentation in thoracic CT images / S. P. Sahu, P. Agrawal, N. D. Londhe, S. Verma // Biomedical and Pharmacology J. 2017. Vol. 10, № 4. P. 1949–1961. doi: 10.13005/bpj/1315

14. Semi-automated segmentation of single and multiple tumors in liver CT images using entropy-based fuzzy region growing / A. Baâzaoui, W. Barhoumi, A. Ahmed, E. Zagrouba // IRBM. 2017. Vol. 38, № 2. P. 98–108. doi: 10.1016/j.irbm.2017.02.003

15. Kashyap R., Tiwari V. Active contours using global models for medical image segmentation // Intern. J. of Computational Systems Engineering. 2018. Vol. 4, № 2–3. P. 195–201. doi: 10.1504/IJCSYSE.2018.091404

16. Tabb A., Duncan K. E., Topp C. N. Segmenting root systems in X-ray computed tomography images using level sets // 2018 IEEE Winter Conf. on Applications of Computer Vision (WACV), Lake Tahoe, USA, 12–15 March 2018. IEEE, 2018. P. 586–595: doi: 10.1109/WACV.2018.00070

17. Marker-based watershed transform method for fully automatic mandibular segmentation from CBCT images / Y. Fan, R. Beare, H. Matthews, P. Schneider, N. Kilpatrick, J. Clement, P. Claes, A. Penington, C. Adamson // Dentomaxillofacial Radiology. 2019. Vol. 48, № 2. P. 20180261. doi: 10.1259/dmfr.20180261

18. Anter A. M., Hassenian A. E. CT liver tumor segmentation hybrid approach using neutrosophic sets, fast fuzzy c-means and adaptive watershed algorithm // Artificial intelligence in medicine. 2019. Vol. 97. P. 105–117. doi: 10.1016/j.artmed.2018.11.007

19. Pankaj A., Ayyappan S. Theoretical Concepts and Technical Aspects on Image Segmentation // Computer Vision: Concepts, Methodologies, Tools and Applications: IGI Global. 2018. P. 2333–2348.

20. A multi-view deep convolutional neural networks for lung nodule segmentation / S. Wang, M. Zhou, O. Gevaert, Z. Tang, D. Dong, Z. Liu, T. Jie // 2017 39th Annual Intern. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Jeju, Korea, 11–15 July 2017. IEEE, 2017. P. 1752–1755. doi: 10.1109/EMBC.2017.8037182

21. Roy R., Chakraborti T., Chowdhury A. S. A deep learning-shape driven level set synergism for pulmonary nodule segmentation // Pattern Recognition Lett. 2019. Vol. 123. P. 31–38. doi: 10.1016/j.patrec.2019.03.004

22. Fast and fully-automated detection and segmentation of pulmonary nodules in thoracic CT scans using deep convolutional neural networks / X. Huang, W. Sun, T.-L. B. Tseng, C. Li, W. Qian // Computerized Medical Imaging and Graphics. 2019. Vol. 74. P. 25–36. doi: 10.1016/j.compmedimag.2019.02.003

23. Mukherjee S., Huang X., Bhagalia R. R. Lung nodule segmentation using deep learned prior based graph cut // 2017 IEEE 14th Intern. Symp. on Biomedical Imaging (ISBI 2017), Melbourne, Australia, 18–21 Apr. 2017. IEEE, 2017. P. 1205–1208. doi: 10.1109/ISBI.2017.7950733

24. Hierarchical parsing and semantic navigation of full body CT data / S. Seifert, A. Barbu, S. K. Zhou, D. Liu, J. Feulner, M. Huber, M. Suehling, A. Cavallaro, D. Comaniciu // Poc. of SPIE. Medical Imaging 2009: Image Processing. 2009. Vol. 7259. P. 29–36. doi: 10.1117/12.812214

25. Stegmann M. B., Ersboll B. K., Larsen R. FAME-a flexible appearance modeling environment // IEEE Transactions on Medical Imaging. 2003. Vol. 22, № 10. P. 1319–1331. doi: 10.1109/TMI.2003.817780

26. Christensen G. E., Rabbitt R. D., Miller M. I. 3D brain mapping using a deformable neuroanatomy // Physics in Medicine & Biology. 1994. Vol. 39, $N \ge 3$. P. 609–618. doi: 10.1088/0031-9155/39/3/022

27. Gordon G. G. Face recognition based on depth and curvature features // Proc. 1992 IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. Champaign, USA, 15–18 June 1992. IEEE, 1992. P. 808–810. doi: 10.1109/CVPR.1992.223253

28. Sethuram A., Ricanek K., Patterson E. A comparative study of active appearance model annotation schemes for the face // Proc. of the Seventh Indian Conf. on Computer Vision, Graphics and Image Processing, 2010. P. 367–374. doi: 10.1145/1924559.1924608

29. Cootes T. F., Edwards G. J., Taylor C. J. Active appearance models // Proc. of European Conf. on Computer Vision. 1998. Vol. 2. P. 484–498.

30. Kamdi S., Krishna R. Image segmentation and region growing algorithm // Intern. J of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE). 2012. Vol. 2, № 1. P. 103–107.

31. Kass M., Witkin A., Terzopoulos D. Snakes: Active contour models // Intern. j. of computer vision. 1988. Vol. 1, № 4. P. 321–331.

32. Radiomics: extracting more features using endoscopic imaging / F. Shariaty, M. Baranov, E. Velichko, M. Galeeva, V. Pavlov // 2019 IEEE Intern. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). St Petersburg, Russia, 17-18 Oct. 2019. IEEE, 2019. P. 181-194. doi: 10.1109/EExPolytech.2019.8906843

33. Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I. H. Textural features for image classification // IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics. 1973. № 6. P. 610-621. doi: 10.1109/TSMC.1973.4309314

34. Punithavathy K., Ramya M., Poobal S. Analysis of statistical texture features for automatic lung cancer detection in PET/CT images // 2015 Intern. Conf. on Robotics, Automation, Control and Embedded Systems (RACE). Chennai, India, 18-20 Feb. 2015. IEEE, 2015. P. 1-5. doi: 10.1109/RACE.2015.7097244

35. Texture-based classification of focal liver lesions on MRI at 3.0 Tesla: A feasibility study in cysts and hemangiomas / Mayerhoefer M. E., Schima W., Trattnig S., Pinker K., Berger-Kulemann V., Ba-Ssalamah A. // J. of Magnetic Resonance Imaging. 2010. Vol. 32, № 2. P. 352-359. doi: 10.1002/jmri.22268

36. Computerized analysis of mammographic parenchymal patterns on a large clinical dataset of full-field digital mammograms: robustness study with two high-risk datasets / H. Li, M. L. Giger, L. Lan, J. B. Brown, A. MacMahon, M. Mussman, O. I. Olopade, C. Sennett // J. of digital imaging. 2012. Vol. 25, № 5. P. 591–598. doi: 10.1007/s10278-012-9452-z

37. Quantitative analysis of lesion morphology and texture features for diagnostic prediction in breast MRI / K. Nie, J.-H. Chen, J. Y. Hon, Y. Chu, O. Nalcioglu, M.-Y. Su // Academic radiology. 2008. Vol. 15, № 12. P. 1513-1525. doi: 10.1016/j.acra.2008.06.005

38. Integrative analysis of DCE-MRI and gene expression profiles in construction of a gene classifier for assessment of hypoxia-related risk of chemoradiotherapy failure in cervical cancer / C. S. Fjeldbo, C. H. Julin, M. Lando, M. F. Forsberg, E.-K. Aarne, J. Alsner, G. B. Kristensen, E. Malinen, H. Lyng // Clinical Cancer Research. 2016. Vol. 22, № 16. P. 4067-4076. doi: 10.1158/1078-0432.CCR-15-2322

39. ADC texture - an imaging biomarker for highgrade glioma? / P. Brynolfsson, D. Nilsson, R. Henriksson, J. Hauksson, M. Karlsson, A. Garpebring, R. Bir-

gander, J. Trygg, T. Nyholm, T. Asklund // Medical physics. 2014. Vol. 41, № 10. P. 101903. doi: 10.1118/1.4894812

40. Radiomics: extracting more information from medical images using advanced feature analysis / P. Lambin, E. Rios-Velazquez, R. Leijenaar, S. Carvalho, R. G. P. M. van Stiphout, P. Granton, C. M. L. Zegers, R. Gillies, R. Boellard, A. Dekker, H. J. W. L. Aerts // European j. of cancer. 2012. Vol. 48, № 4. P. 441–446. doi: 10.1016/j.ejca.2011.11.036

41. Decoding tumour phenotype by noninvasive imaging using a quantitative radiomics approach / H. J. W. L. Aerts, E. R. Velazquez, R. T. H. Leijenaar, C. Parmar, P. Grossmann, S. Carvalho, J. Bussink, R. Monshouwer, B. Haibe-Kains, D. Rietveld, F. Hoebers, M. M. Rietbergen, C. R. Leemans, A. Dekker, J. Quackenbush, R. J. Gillies, P. Lambin // Nature com-Vol. 5, № 1. P. 1–9. doi: munications. 2014. 10.1038/ncomms5006

42. FDG PET/CT radiomics for predicting the outcome of locally advanced rectal cancer / P. Lovinfosse, M. Polus, D. V. Daele, P. Martinive, F. Daenen, M. Hatt, D. Visvikis, B. Koopmansch, F. Lambert, C. Coimbra, L. Seidel, A. Albert, P. Delvenne, R. Hustinx // European j. of nuclear medicine and molecular imaging. 2018. Vol. 45, № 3. P. 365–375. doi: 10.1007/s00259-017-3855-5

43. Cho H.-h., Park H. Classification of low-grade and high-grade glioma using multi-modal image radiomics features // 2017 $39^{th}\,\bar{A}nnual$ Intern. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Jeju, Korea, 11-15 July 2017. IEEE, 2017. P. 3081-3084. doi: 10.1109/EMBC.2017.8037508

44. Al-Kilidar S. H., George L. E. Texture classification using gradient features with artificial neural network // J. of Southwest Jiaotong University. 2022. Vol. 55, № 1. doi: 10.35741/issn.0258-2724.55.1.13

45. Smith J. R. Integrated spatial and feature image systems: Retrieval, analysis and compression. Columbia University, 1997. 178 p.

46. Ojala T., Pietikainen M., Maenpaa T. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2002. Vol. 24, № 7. P. 971–987. doi: 10.1109/TPAMI.2002.1017623

47. Su K.-Y., Lee C.-H. Speech recognition using weighted HMM and subspace projection approaches // IEEE transactions on speech and audio processing. 1994. Vol. 2, № 1. P. 69–79. doi: 10.1109/89.260336

Информация об авторах

Шариати Фаридоддин – магистр (2021), ассистент (2021) Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Автор более 10 научных работ. Сфера научных интересов – обработка изображений; обработка сигналов; компьютерное зрение; машинное обучение.

Адрес: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия

E-mail: shariati2.f@edu.spbstu.ru

https://orcid.org/0000-0002-7060-8826

Применение модели внешнего вида текстуры для сегментации легочных узлов при компьютерной томографии грудной клетки **Application of a Texture Appearance Model for Segmentation** of Lung Nodules on Computed Tomography of the Chest

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 3. С. 96–117 Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 96–117

Павлов Виталий Александрович – кандидат технических наук (2020), ассистент (2021) Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Научный сотрудник Центра персонализированной медицины Национального медицинского исследовательского центра им. В. А. Алмазова. Автор более 40 научных работ. Сфера научных интересов – обработка сигналов; обработка изображений; компьютерное зрение; машинное обучение; глубокое обучение. Адрес: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия

E-mail: pavlov_va@spbstu.ru

https://orcid.org/0000-0003-0726-6613

Завьялов Сергей Викторович – кандидат технических наук (2015), доцент (2020) Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Автор более 90 научных работ. Сфера научных интересов – обработка сигналов; обработка изображений. Адрес: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия

E-mail: zavyalov sv@spbstu.ru

https://orcid.org/0000-0003-3398-3616

Махди Оруджи – Ph.D. (2012) в области электротехники по специальности "Системы связи", Университет штата Луизиана (Батон-Руж, Луизиана, США). Приглашенный профессор Калифорнийского университета (США, Дэйвис). Автор более 70 научных работ. Сфера научных интересов – обработка изображений; обработка сигналов; компьютерное зрение; машинное обучение.

Адрес: Калифорнийский университет, 1 Shields Ave, Дэвис, Калифорния 95616, США E-mail: morooji@gmail.com https://orcid.org/0000-0003-1129-0667

Первунина Татьяна Михайловна – доктор медицинских наук (2019), доцент (2015) Национального медицинского исследовательского центра им. В. А. Алмазова. Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – персонифицированные программы в ведении пациентов с врожденными пороками сердечно-сосудистой и мочевой систем; изучение кардиоренального синдрома в периоде и возможностей нефропротективной терапии в детской возрастной группе; компьютерная томография.

Адрес: Национальный медицинский исследовательский центр им. В. А. Алмазова, ул. Аккуратова, д. 2, Санкт-Петербург, 197341, Россия

E-mail: ptm.pervunina@yandex.ru

https://orcid.org/0000-0001-9948-7303

References

1. Shariaty F., Orooji M., Velichko E. N., Zavjalov S. V. Texture Appearance Model, a New Model-Based Segmentation Paradigm, Application on the Segmentation of Lung Nodule in the CT Scan of the Chest. Computers in Biology and Medicine. 2021, vol. 140, p. 105086. doi: 10.1016/j.compbiomed.2021.105086

2. Shariaty F., Mousavi M. Application of CAD Systems for the Automatic Detection of Lung Nodules. Informatics in Medicine Unlocked. 2019, vol. 15, p. 100173. doi: 10.1016/j.imu.2019.100173

3. Zhang Y., Oikonomou A., Wong A., Haider M. A., Khalvati F. Radiomics-Based Prognosis Analysis for Non-Small Cell Lung Cancer. Scientific Reports. 2017, vol. 7, no. 1, pp. 1–8. doi: 10.1038/srep46349

4. Wang Q., Kang W., Hu H., Wang B. HOSVD-Based 3D Active Appearance Model: Segmentation of Lung Fields in CT Images. J. of Medical Systems. 2016, vol. 40, no. 7, pp. 1–11. doi: 10.1007/s10916-016-0535-0

5. Cetin M., Iskurt A. An Automatic 3-d Reconstruction of Coronary Arteries by Stereopsis. J. of Medical Systems. 2016, vol. 40, no. 4, pp. 1–11. doi: 10.1007/s10916-016-0455-z 6. Shariaty F., Orooji M., Mousavi M., Baranov M., Velichko E. Automatic Lung Segmentation in Computed Tomography Images Using Active Shape Model. 2020 IEEE Intern. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), St Petersburg, Russia, 15–16 Oct. 2020. Piscataway, IEEE, 2020, pp. 156–159. doi: 10.1109/EExPolytech50912.2020.9243982

7. Chen X., Udupa J. K., Bagci U., Zhuge Y., Yao J. Medical Image Segmentation by Combining Graph Cuts and Oriented Active Appearance Models. IEEE transactions on image processing. 2012, vol. 21, no. 4, pp. 2035–2046. doi: 10.1109/TIP.2012.2186306

8. Mousavi M., Shariaty F., Orooji M., Velichko E. The Performance of Active-Contour and Region Growing Methods Against Noises in the Segmentation of Computed-Tomography Scans. Book Chapter in Intern. Youth Conf. on Electronics, Telecommunications and Information Technologies. Springer, 2021, pp. 573–582. doi: 10.1007/978-3-030-58868-7_63

9. Shariaty F., Davydov V., Yushkova V., Glinushkin A., Rud V. Y. Automated Pulmonary Nodule Detection System in Computed Tomography Images Based on Active-Contour and SVM Classification Algorithm. J. of

Применение модели внешнего вида текстуры для сегментации легочных узлов при компьютерной томографии грудной клетки Application of a Texture Appearance Model for Segmentation of Lung Nodules on Computed Tomography of the Chest

Physics: Conf. Series. 2019, vol. 1410, no. 1, p. 012075. doi: 10.1088/1742-6596/1410/1/012075

10. Shariaty F., Hosseinlou S., Rud V. Y. Automatic Lung Segmentation Method in Computed Tomography Scans. J. of Physics: Conf. Series, 2019, vol. 1236, no. 1, p. 012028. doi: 10.1088/1742-6596/1236/1/012028

11. Abdulameer M. H., Sheikh Abdullah S. N. H., Othman Z. A. A Modified Active Appearance Model Based on an Adaptive Artificial Bee Colony. The Scientific World J. 2014, vol. 2014. doi: 10.1155/2014/879031

12. Haas B., Coradi T., Scholz M., Kunz P., Huber M., Oppitz U., André L., Lengkeek V., Huyskens D., van Esch A., Reddick R. Automatic Segmentation of Thoracic and Pelvic CT Images for Radiotherapy Planning Using Implicit Anatomic Knowledge and Organ-Specific Segmentation Strategies. Physics in Medicine & Biology. 2008, vol. 53, no. 6, pp. 1751–1771. doi: 10.1088/0031-9155/53/6/017

13. Sahu S. P., Agrawal P., Londhe N. D., Verma S. A New Hybrid Approach Using Fuzzy Clustering and Morphological Operations for Lung Segmentation in Thoracic CT Images. Biomedical and Pharmacology J. 2017, vol. 10, no. 4, pp. 1949–1961. doi: 10.13005/bpj/1315

14. Baâzaoui A., Barhoumi W., Ahmed A., Zagrouba E. Semi-Automated Segmentation of Single and Multiple Tumors in Liver CT Images Using Entropy-Based Fuzzy Region Growing. IRBM. 2017, vol. 38, no. 2, pp. 98–108. doi: 10.1016/j.irbm.2017.02.003

15. Kashyap R., Tiwari V. Active Contours Using Global Models for Medical Image Segmentation. Intern. J. of Computational Systems Engineering. 2018, vol. 4, no. 2–3, pp. 195–201. doi: 10.1504/IJCSYSE.2018.091404

16. Tabb A., Duncan K. E., Topp C. N. Segmenting Root Systems in X-ray Computed Tomography Images Using Level Sets. 2018 IEEE Winter Conf. on Applications of Computer Vision (WACV), Lake Tahoe, USA, 12–15 March 2018. IEEE, 2018, pp. 586–595: doi: 10.1109/WACV.2018.00070

17. Fan Y., Beare R., Matthews H., Schneider P., Kilpatrick N., Clement J., Claes P., Penington A., Adamson C. Marker-Based Watershed Transform Method for Fully Automatic Mandibular Segmentation from CBCT Images. Dentomaxillofacial Radiology. 2019. vol. 48, no. 2, p. 20180261. doi: 10.1259/dmfr.20180261

18. Anter A. M., Hassenian A. E. CT Liver Tumor Segmentation Hybrid Approach Using Neutrosophic Sets, Fast Fuzzy C-Means and Adaptive Watershed Algorithm. Artificial Intelligence in Medicine. 2019, vol. 97, pp. 105–117. doi: 10.1016/j.artmed.2018.11.007

19. Pankaj A., Ayyappan S. Theoretical Concepts and Technical Aspects on Image Segmentation. Computer Vision: Concepts, Methodologies, Tools and Applications: IGI Global. 2018, pp. 2333–2348.

20. Wang S., Zhou M., Gevaert O., Tang Z., Dong D., Liu Z., Jie T. A Multi-View Deep Convolutional Neural Networks for Lung Nodule Segmentation. 2017 39th Annual Intern. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Jeju, Korea, 11–15 July 2017. IEEE, 2017, pp. 1752–1755. doi: 10.1109/EMBC.2017.8037182

21. Roy R., Chakraborti T., Chowdhury A. S. A Deep Learning-Shape Driven Level Set Synergism for Pulmonary Nodule Segmentation. Pattern Recognition Letters. 2019, vol. 123, pp. 31–38. doi: 10.1016/j.patrec.2019.03.004

22. Huang X., Sun W., Tseng T.-L. B., Li C., Qian W. Fast and Fully-Automated Detection and Segmentation of Pulmonary Nodules in Thoracic CT Scans Using Deep Convolutional Neural Networks. Computerized Medical Imaging and Graphics. 2019, vol. 74, pp. 25–36. doi: 10.1016/j.compmedimag.2019.02.003

23. Mukherjee S., Huang X., Bhagalia R. R. Lung Nodule Segmentation Using Deep Learned Prior Based Graph Cut. 2017 IEEE 14th Intern. Symp. on Biomedical Imaging (ISBI 2017), Melbourne, Australia, 18–21 April 2017. IEEE, 2017, pp. 1205–1208. doi: 10.1109/ISBI.2017.7950733

24. Seifert S., Barbu A., Zhou S. K., Liu D., Feulner J., Huber M., Suehling M., Cavallaro A., Comaniciu D. Hierarchical Parsing And Semantic Navigation of Full Body CT Data. Proc. of SPIE. Medical Imaging 2009: Image Processing. 2009, vol. 7259, pp. 29–36. doi: 10.1117/12.812214

25. Stegmann M. B., Ersboll B. K., Larsen R. FAME-a Flexible Appearance Modeling Environment. IEEE Transactions on Medical Imaging. 2003, vol. 22, no. 10, pp. 1319–1331. doi: 10.1109/TMI.2003.817780

26. Christensen G. E., Rabbitt R. D., Miller M. I. 3D Brain Mapping Using a Deformable Neuroanatomy. Physics in Medicine & Biology. 1994, vol. 39, no. 3, pp. 609–618. doi: 10.1088/0031-9155/39/3/022

27. Gordon G. G. Face Recognition Based on Depth and Curvature Features. Proc. 1992 IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. Champaign, USA, 15–18 June 1992. IEEE, 1992, pp. 808–810. doi: 10.1109/CVPR.1992.223253

28. Sethuram A., Ricanek K., Patterson E. A Comparative Study of Active Appearance Model Annotation Schemes for the Face. Proc. of the Seventh Indian Conf. on Computer Vision, Graphics and Image Processing. 2010, pp. 367–374. doi: 10.1145/1924559.1924608

29. Cootes T. F., Edwards G. J., Taylor C. J. Active Appearance Models. Proc. of European Conf. on Computer Vision. 1998, vol. 2, pp. 484–498.

30. Kamdi S., Krishna R. Image Segmentation and Region Growing Algorithm. Intern. J of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE). 2012, vol. 2, no. 1, pp. 103–107.

31. Kass M., Witkin A., Terzopoulos D. Snakes: Active Contour Models. Intern. J. of Computer Vision. 1988, vol. 1, no. 4, pp. 321–331.

32. Shariaty F., Baranov M., Velichko E., Galeeva M., Pavlov V. Radiomics: Extracting More Features Using Endoscopic Imaging. 2019 IEEE Intern. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). St. Petersburg, Russia, 17–18 Oct. 2019. IEEE, 2019, pp. 181–194. doi: 10.1109/EExPolytech.2019.8906843

Применение модели внешнего вида текстуры для сегментации легочных узлов при компьютерной томографии грудной клетки Application of a Texture Appearance Model for Segmentation of Lung Nodules on Computed Tomography of the Chest

33. Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I. H. Textural Features for Image Classification. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1973, no. 6, pp. 610–621. doi: 10.1109/TSMC.1973.4309314

34. Punithavathy K., Ramya M., Poobal S. Analysis of Statistical Texture Features for Automatic Lung Cancer Detection in PET/CT Images. 2015 Intern. Conf. on Robotics, Automation, Control and Embedded Systems (RACE). Chennai, India, 18–20 Feb. 2015. IEEE, 2015, pp. 1–5. doi: 10.1109/RACE.2015.7097244

35. Mayerhoefer M. E., Schima W., Trattnig S., Pinker K., Berger-Kulemann V., Ba-Ssalamah A. Texture-Based Classification of Focal Liver Lesions on MRI at 3.0 Tesla: A Feasibility Study in Cysts and Hemangiomas. J. of Magnetic Resonance Imaging. 2010, vol. 32, no. 2, pp. 352–359. doi: 10.1002/jmri.22268

36. Li H., Giger M. L., Lan L., Brown J. B., MacMahon A., Mussman M., Olopade O. I., Sennett C. Computerized Analysis of Mammographic Parenchymal Patterns on a Large Clinical Dataset of Full-Field Digital Mammograms: Robustness Study With Two High-Risk Datasets. J. of Digital Imaging. 2012, vol. 25, no. 5, pp. 591–598. doi: 10.1007/s10278-012-9452-z

37. Nie K, Chen J.-H., Hon J. Y., Chu Y., Nalcioglu O., Su M.-Y. Quantitative Analysis of Lesion Morphology and Texture Features for Diagnostic Prediction in Breast MRI. Academic Radiology. 2008, vol. 15, no. 12, pp. 1513– 1525. doi: 10.1016/j.acra.2008.06.005

38. Fjeldbo C. S., Julin C. H., Lando M., Forsberg M. F., Aarne E.-K., Alsner J., Kristensen G. B., Malinen E., Lyng H. Integrative Analysis of DCE-MRI and Gene Expression Profiles in Construction of a Gene Classifier for Assessment of Hypoxia-Related Risk of Chemoradiotherapy Failure in Cervical Cancer. Clinical Cancer Research. 2016, vol. 22, no. 16, pp. 4067–4076. doi: 10.1158/1078-0432.CCR-15-2322

39. Brynolfsson P., Nilsson D., Henriksson R., Hauksson J., Karlsson M., Garpebring A., Birgander R., Trygg J., Nyholm T., Asklund T. ADC Texture – an Imaging Biomarker for High-Grade Glioma? Medical Physics. 2014, vol. 41, no. 10, p. 101903. doi: 10.1118/1.4894812 40. Lambin P., Rios-Velazquez E., Leijenaar R., Carvalho S., van Stiphout R. G. P. M., Granton P., Zegers C. M. L., Gillies R., Boellard R., Dekker A., Aerts H. J. W. L. Radiomics: Extracting More Information from Medical Images Using Advanced Feature Analysis. European J. of Cancer. 2012, vol. 48, no. 4, pp. 441–446. doi: 10.1016/j.ejca.2011.11.036

41. Aerts H. J. W. L., Velazquez E. R., Leijenaar R. T. H., Parmar C., Grossmann P., Carvalho S., Bussink J., Monshouwer R., Haibe-Kains B., Rietveld D., Hoebers F., Rietbergen M. M., Leemans C. R., Dekker A., Quackenbush J., Gillies R. J., Lambin P. Decoding Tumour Phenotype by Noninvasive Imaging Using a Quantitative Radiomics Approach. Nature Communications. 2014, vol. 5, no. 1, pp. 1–9. doi: 10.1038/ncomms5006

42. Lovinfosse P., Polus M., Daele D. V., Martinive P., Daenen F., Hatt M., Visvikis D., Koopmansch B., Lambert F., Coimbra C., Seidel L., Albert A., Delvenne P., Hustinx R. FDG PET/CT Radiomics for Predicting the Outcome of Locally Advanced Rectal Cancer. European J. of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. 2018, vol. 45, no. 3, pp. 365–375. doi: 10.1007/s00259-017-3855-5

43. Cho H.-h., Park H. Classification of Low-Grade and High-Grade Glioma Using Multi-Modal Image Radiomics Features. 2017 39th Annual Intern. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Jeju, Korea, 11–15 July 2017. IEEE, 2017, pp. 3081–3084. doi: 10.1109/EMBC.2017.8037508

44. Al-Kilidar S. H., George L. E. Texture Classification Using Gradient Features with Artificial Neural Network. J. of Southwest Jiaotong University. 2022, vol. 55, no. 1. doi: 10.35741/issn.0258-2724.55.1.13

45. Smith J. R. Integrated Spatial And Feature Image Systems: Retrieval, Analysis and Compression. Columbia University, 1997, 178 p.

46. Ojala T., Pietikainen M., Maenpaa T. Multiresolution Gray-Scale and Rotation Invariant Texture Classification with Local Binary Patterns. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2002, vol. 24, no. 7, pp. 971–987. doi: 10.1109/TPAMI.2002.1017623

47. Su K.-Y., Lee C.-H. Speech Recognition Using Weighted HMM and Subspace Projection Approaches. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing. 1994, vol. 2, no. 1, pp. 69–79. doi: 10.1109/89.260336

Information about the authors

Shariati Faridoddin, Master in "Electrical engineering" (2021), Assistant (2021) of the Higher School of Applied Physics and Space Technologies of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. The author of more than 15 scientific publications. Area of expertise: signal processing; image processing; computer vision; machine learning. Address: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politekhnicheskaya St., St Petersburg 195251, Russia E-mail: shariati2.f@edu.spbstu.ru

https://orcid.org/0000-0002-7060-8826

Vitalii A. Pavlov, Cand. Sci. (Eng.) (2020), Assistant (2021) of the Higher School of Applied Physics and Space Technologies of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Researcher of Center for Personalized Medicine of Almazov National Medical Research Centre. The author of more than 40 scientific publications. Area of expertise: signal processing; image processing; computer vision; machine learning, deep learning.

Address: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politekhnicheskaya St., St Petersburg 195251, Russia E-mail: pavlov_va@spbstu.ru

https://orcid.org/0000-0003-0726-6613

Sergey V. Zavyalov, Cand. Sci. (Eng.) (2015), Associate Professor (2020) of the Higher School of Applied Physics and Space Technologies of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. The author of more than 90 scientific publications. Area of expertise: signal processing; image processing.

Address: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politekhnicheskaya St., St Petersburg 195251, Russia E-mail: zavyalov_sv@spbstu.ru

https://orcid.org/0000-0003-3398-3616

Mahdi Orooji, Ph.D. (2012) in electrical engineering with a degree in communications systems from Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana, USA. Visiting Professor at the University of California, USA, Davis. The author of more than 70 scientific publications. Area of expertise: signal processing, image processing, computer vision, machine learning.

Address: University of California, 1 Shields Ave, Davis, CA 95616, United States E-mail: morooji@gmail.com https://orcid.org/0000-0003-1129-0667

Tatyana M. Pervunina, Dr Sci. (Medicine) (2019), Associate Professor (2015) of Almazov National Medical Research Centre. The author of over 100 scientific publications. Area of expertise: personalized programs in the management of patients with congenital malformations of the cardiovascular and urinary systems; the study of cardiorenal syndrome in the period and the possibilities of nephroprotective therapy in the pediatric age group; computed tomography.

Address: Almazov National Medical Research Centre, 2 Akkuratova St., St Petersburg 197341, Russia. E-mail: ptm.pervunina@yandex.ru https://orcid.org/0000-0001-9948-7303

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 учебныки, учебные пособия, справочники, словари, диссертации и другие малотиражные издания.

Если описываемая публикация имеет цифровой идентификатор Digital Object Identifier (DOI), его необходимо указывать в самом конце библиографической ссылки в формате "doi: ...". Проверять наличие DOI статьи следует на сайте: http://search.crossref.org или https://www.citethisforme.com.

Нежелательны ссылки на источники более 10–15-летней давности, приветствуются ссылки на современные источники, имеющие идентификатор doi.

За достоверность и правильность оформления представляемых библиографических данных авторы несут ответственность вплоть до отказа в праве на публикацию.

Аннотация на английском языке (Abstract) в русскоязычном издании и международных базах данных является для иностранных читателей основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и изложенных в ней результатах исследований. Зарубежные специалисты по аннотации оценивают публикацию, определяют свой интерес к работе российского ученого, могут использовать ее в своей публикации и сделать на нее ссылку, открыть дискуссию с автором.

Текст аннотации должен быть связным и информативным. При написании аннотации рекомендуется использовать Present Simple Tense. Present Perfect Tense является допустимым. Рекомендуемый объем – 200–250 слов. Список литературы (References) для зарубежных баз данных приводится полностью отдельным блоком, повторяя список литературы к русскоязычной части. Если в списке литературы есть ссылки на иностранные публикации, то они полностью повторяются в списке, готовящемся в романском алфавите. В References совершенно недопустимо использовать российский ГОСТ 7.0.5-2008. Библиографический список представляется с переводом русскоязычных источников на латиницу. При этом применяется транслитерация по системе BSI (см. http://ru.translit.net/?account=bsi).

Типовые примеры описания в References приведены на сайте журнала https://re.eltech.ru.

Сведения об авторах

Включают для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание (с датами присвоения и присуждения), почетные звания (с датами присвоения и присуждения), краткую научную биографию, количество печатных работ и сферу научных интересов (не более 5-6 строк), название организации, должность, служебный и домашний адреса, служебный и домашний телефоны, адрес электронной почты. Если ученых и/или академических степеней и званий нет, то следует указать место получения высшего образования, год окончания вуза и специальность. Также требуется включать индентификационный номер исследователя ORCID (Open Researcher and Contributor ID), который отображается как адрес вида http://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx. 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 основного текста 11 pt, остальных сведений 10 pt; выравнивание по ширине; абзацный отступ 0.6 см; межстрочный интервал "Множитель 1.1"; автоматическая расстановка переносов.

Правила верстки списка литературы, формул, рисунков и таблиц подробно описаны на сайте https://re.eltech.ru.

Перечень основных тематических направлений журнала

Тематика журнала соответствует группам специальностей научных работников:

- 05.12.00 "Радиотехника и связь" (05.12.04 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения, 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии, 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций, 05.12.14 Радиолокация и радионавигация);
- 05.27.00 "Электроника" (05.27.01 Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника на квантовых эффектах, 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника, 05.27.03 – Квантовая электроника, 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники);
- 05.11.00 "Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы" в редакции приказа ВАК от 10.01.2012 № 5 (05.11.01 – Приборы и методы измерения по видам измерений, 05.11.03 – Приборы навигации, 05.11.06 – Акустические приборы и системы, 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы, 05.11.08 – Радиоизмерительные приборы, 05.11.10 – Приборы и методы для измерения ионизирующих излучений и рентгеновские приборы, 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, 05.11.14 – Технология приборостроения, 05.11.15 - Метрология и метрологическое обеспечение, 05.11.16 -Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям), 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения, 05.11.18 – Приборы и методы преобразования изображений и звука).

Указанные специальности представляются в журнале следующими основными рубриками:

"Радиотехника и связь":

- Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов.
- Проектирование и технология радиоэлектронных средств.
- Телевидение и обработка изображений.
- Электродинамика, микроволновая техника, антенны.
- Системы, сети и устройства телекоммуникаций.
- Радиолокация и радионавигация.

"Электроника":

- Микро- и наноэлектроника.
- Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника.
- Фотоника.
- Электроника СВЧ.

"Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы":

- Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн.
- Метрология и информационно-измерительные приборы и системы.
- Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий.

Адрес редакционной коллегии: 197022, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5 литера Ф, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", редакция журнала "Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника"

Технические вопросы можно выяснить по адресу radioelectronic@yandex.ru

.....

Уважаемые авторы!

Обратите внимание, что на основании рекомендации Высшей аттестационной комиссии (ВАК) приказом Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118 утверждена новая номенклатура научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени.

Защиты диссертаций по старой номенклатуре научных специальностей (приказ Министерства образования и науки Российской Федерации от 23 октября 2017 г. № 1027 с последующими изменениями) будут идти до 16 октября 2022 г.

На основании рекомендации президиума ВАК от 21 мая 2021 г. № 13/19 журнал будет публиковать статьи по старой номенклатуре научных специальностей до 4-го номера включительно (выход номера в сентябре 2022 г.).

Соответственно, прием статей по данной номенклатуре будет осуществляться до 1 июля 2022 г. Прием журналом статей по новой номенклатуре научных специальностей – с 01 января 2022 г.

С 01.01.2022 г. по 01.07.2022 г. журналом принимаются статьи по старой и новой номенклатурам научных специальностей, с 01.07.2022 г. – только по новой номенклатуре научных специальностей.

Перечень основных тематических направлений журнала

Тематика журнала соответствует группам специальностей научных работников.

Старая номенклатура научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени (действует до 16.10.2022 г.):

- 05.12.00 "Радиотехника и связь" (05.12.04 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения, 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии, 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций, 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация);
- 05.27.00 "Электроника" (05.27.01 Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника на квантовых эффектах, 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника, 05.27.03 – Квантовая электроника, 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники);
- 05.11.00 "Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы" (05.11.01 Приборы и методы измерения по видам измерений, 05.11.03 Приборы навигации, 05.11.06 Акустические приборы и системы, 05.11.07 Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы, 05.11.08 Радиоизмерительные приборы, 05.11.10 Приборы и методы для измерения ионизирующих излучений и рентгеновские приборы, 05.11.13 Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, 05.11.14 Технология приборостроения, 05.11.15 Метрология и метрологическое обеспечение, 05.11.16 Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям), 05.11.17 Приборы, системы и изделия медицинского назначения, 05.11.18 Приборы и методы преобразования изображений и звука).

Новая номенклатура научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени:

2.2 – Электроника, фотоника, приборостроение и связь:

- 2.2.1 Вакуумная и плазменная электроника.
- 2.2.2 Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.
- 2.2.3 Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.
- 2.2.4 Приборы и методы измерения (по видам измерений).
- 2.2.5 Приборы навигации.
- 2.2.6 Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.
- 2.2.7 Фотоника.
- 2.2.8 Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.
- 2.2.9 Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры.
- 2.2.10 Метрология и метрологическое обеспечение.
- 2.2.11 Информационно-измерительные и управляющие системы.
- 2.2.12 Приборы, системы и изделия медицинского назначения.
- 2.2.13 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

- 2.2.14 Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.
- 2.2.15 Системы, сети и устройства телекоммуникаций.
- 2.2.16 Радиолокация и радионавигация.

Указанные специальности представляются в журнале следующими основными рубриками:

- Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов.
- Проектирование и технология радиоэлектронных средств.
- Телевидение и обработка изображений.
- Электродинамика, микроволновая техника, антенны.
- Системы, сети и устройства телекоммуникаций.
- Радиолокация и радионавигация.
- Микро- и наноэлектроника.
- Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника.
- Фотоника.
- Электроника СВЧ.
- Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн.
- Метрология и информационно-измерительные приборы и системы.
- Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий.

.....

.....

Известия высших учебных заведений России. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА Journal of the Russian Universities. RADIOELECTRONICS

Том 25 № 3 2022

Vol. 25 No. 3 2022

Научный редактор А. М. Мончак Редакторы Э. К. Долгатов, И. Г. Скачек Компьютерная верстка М. И. Поповой, Е. И. Третьяковой Science Editor A. M. Monchak Editors E. K. Dolgatov, I. G. Skachek DTP Professional M. I. Popova E. I. Tretyakova

Подписано в печать 27.06.22. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать цифровая. Уч.-изд. л. 16.25. Печ. л. 15.75. Тираж 300 экз. (1-й завод 1–150 экз.) Заказ 93. Цена свободная.

Signed to print 27.06.22. Sheet size 60×84 1/8. Educational-ed. liter. 16.25. Printed sheets 15.75. Number of copies 300. Printing plant 1–150 copies. Order no. 93. Free price.

> Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 197022, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5 Ф

ETU Publishing house 5 F Prof. Popov St., St Petersburg 197022, Russia