



DOI: 10.32603/1993-8985

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

Известия высших учебных заведений России

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Том 26 № 3 2023



Journal of the Russian Universities

RADIOELECTRONICS

Vol. 26 No. 3 2023

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

2023

Saint Petersburg
ETU Publishing house

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

Индекс по каталогу АО «Почта России» П4296

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

Издается 6 раз в год.

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

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

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

Редакция журнала:

197022, Санкт-Петербург,

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

Тел.: 8 (812) 234-10-13,

e-mail: radioelectronic@yandex.ru

RE.ELTECH.RU

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», оформление, 2020

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

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

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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 LANDERANTA, PhD, Prof., Технический университет, Лаппеенранта, Финляндия

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

Piotr SAMCZYNSKI, PhD, Dr Sci., Associate Prof., Варшавский технологический университет, Институт электронных систем, Варшава, Польша

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Журнал выполняет следующие задачи:

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

позиций ученых России в области теории и практики радиоэлектроники;

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



Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0



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

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

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

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF

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

CHAIRMAN OF THE EDITORIAL BOARD

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

EDITORIAL BOARD:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Key Objectives:

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

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



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

СОДЕРЖАНИЕ

Обзорные статьи

Электроника СВЧ

- Торина Е. М., Кочемасов В. Н., Сафин А. Р. Транзисторы для твердотельных СВЧ-переключателей (обзор).....6

Научные статьи

Телевидение и обработка изображений

- Пыко Н. С., Тишин Д. В., Искандиров П. Ю., Гафуров А. М., Усманов Б. М., Богачев М. И. Непараметрические байесовские сети как инструмент комплексирования данных мультимасштабного анализа временных рядов и дистанционного зондирования.....32

Электродинамика, микроволновая техника, антенны

- Неустроев И. Д., Легкова Т. К., Цымбалюк А. А., Комлев А. Е. Тонкие пленки диоксида ванадия для применения в СВЧ-ключах с электрическим управлением.....48
- Межевов П. А., Коровин К. О., Ликонцев А. Н. Создание кольцевой антенной решетки на основе излучателей Вивальди для широкополосного канала связи с ретрансляцией.....58

Радиолокация и радионавигация

- Монаков А. А. Моделирование рассеянного шероховатой поверхностью радиосигнала методом стационарных точек.....67
- Ле Минь Хоанг, Коновалов А. А., Дао Ван Лук. Сопровождение маневрирующих целей с использованием многомодельного алгоритма с переменной структурой.....77
- Xuan Truong Nguyen, Kim Phuong Phung, Quang Hieu Dang, Xung Ha Vo, Hoa Tien Vu. A Target Threat Assessment Method for Application in Air Defense Command and Control Systems....90
- Горбунов И. Г., Веремьев В. И., Шестак В. Д., Комаров Г. В., Мысленков С. А., Сильвестрова К. П. О верификации измерений скорости поверхностных течений когерентным радаром СВЧ-диапазона с помощью дрейфтеров.....99

Электроника СВЧ

- Старков А. С., Анохин А. С., Еськов А. В., Семенов А. А., Холкин А. Л. Электрокалорический эффект в многослойных сегнетоэлектрических структурах.....111

Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн

- Астафьев А. М., Альтмарк А. М., Лесив Н. А., Чирцов А. С. Диагностика атмосферных плазменных струй барьерного разряда в потоке аргона и гелия в цилиндрическом СВЧ-резонаторе.....122

От редакции

- Памяти И. Б. Вендик.....136
- Правила для авторов статей.....140

CONTENTS

Review articles

SHF Electronics

- Torina E. M., Kochemasov V. N., Safin A. R.** Transistors for Solid-State Microwave Switches (A Review).....6

Original articles

Television and Image Processing

- Pyko N. S., Tishin D. V., Iskandirov P. Yu., Gafurov A. M., Usmanov B. M., Bogachev M. I.** Nonparametric Bayesian Networks as a Tool of Multiscale Time Series Analysis and Remote Sensing Data Integration.....32

Electrodynamics, Microwave Engineering, Antennas

- Neustroev I. D., Legkova T. K., Tsymbalyuk A. A., Komlev A. E.** Thin Vanadium Dioxide Films for Use in Microwave Keys with Electric Control.....48
- Mezhevov P. A., Korovin K. O., Likontsev A. N.** Creation of a Vivaldi-Based Circular Antenna Array for Broadband Relay Channels.....58

Radar and Navigation

- Monakov A. A.** Simulation of a Radio Signal Scattered from a Rough Surface by the Method of Stationary Points.....67
- Le Minh Hoang, Konovalov A. A., Dao Van Luc.** Tracking of Maneuvering Targets Using a Variable Structure Multiple Model Algorithm.....77
- Xuan Truong Nguyen, Kim Phuong Phung, Quang Hieu Dang, Xung Ha Vo, Hoa Tien Vu.** A Target Threat Assessment Method for Application in Air Defense Command and Control Systems....90
- Gorbunov I. G., Veremyev V. I., Shestak V. D., Komarov G. V., Myslenkov S. A., Silvestrova K. P.** Verifying Measurements of Surface Current Velocities by X-Band Coherent Radar Using Drifter Data.....99

SHF Electronics

- Starkov A. S., Anokhin A. S., Es'kov A. V., Semenov A. A., Kholkin A. L.** Electrocaloric Effect in Multilayer Ferroelectric Structures.....111

Measuring Systems and Instruments Based on Acoustic, Optical and Radio Waves

- Astafiev A. M., Altmark A. M., Lesiv N. A., Chirtsov A. S.** Diagnostics of Atmospheric Plasma Jets of Helium and Argon Barrier Discharge in a Cylindrical Microwave Cavity Resonator.....122

From the Editor

- In Memory of I. B. Vendik**.....136
- Author's Guide**.....140

Транзисторы для твердотельных СВЧ-переключателей (обзор)

Е. М. Торина^{1, 2}, В. Н. Кочемасов¹, А. Р. Сафин^{1, 2, 3✉}

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. К характеристикам твердотельных СВЧ-переключателей предъявляются различные требования в зависимости от приложения и решаемых технических задач. Естественно, не существует универсального решения, удовлетворяющего сразу всем требованиям. Стремление к совершенствованию параметров переключателей привело к появлению устройств, изготовленных по различным технологиям. Для понимания тенденций развития техники переключателей важно рассмотреть технологии и возможности полупроводниковых приборов, являющихся основой схем переключателей.

Цель работы. Обзор типов транзисторов, используемых в твердотельных переключателях.

Материалы и методы. В основе поиска и подбора литературы для обзора лежит хронологический принцип. Глубина поиска для рассмотрения параметров конечных компонентов не более 10 лет, для рассмотрения технологий и структурных решений – более 10 лет, ввиду желания проследить историю развития и подходы к созданию полупроводниковых устройств, которые привели к возникновению современной компонентной базы. Конечный массив источников сформирован из научных публикаций, содержащих фактографическую информацию, представленную в обзоре, или дополняющих ее.

Результаты. Рассмотрены типы, структуры, материалы, характеристики и технологии изготовления транзисторов, используемых в переключателях. Представлены достижимые параметры переключателей, построенных на рассмотренных приборах.

Заключение. Выбор того или иного типа транзистора для переключателей зависит от требований, предъявляемых к параметрам и эксплуатационным характеристикам конечного устройства. На данный момент среди транзисторных решений для переключателей доминируют полевые транзисторы (ПТ) различных типов: GaAs- и GaN-транзисторы с повышенной подвижностью электронов (High Electron Mobility Transistor – НЕМТ), а также Si КМОП ПТ, реализованные как по стандартной, так и по технологиям "кремний на изоляторе" и "кремний на сапфире". Анализ литературы показал возможные перспективы развития технологии БиКМОП биполярных транзисторов с гетеропереходом.

Ключевые слова: твердотельные переключатели, ТВПЭ, КМОП, КНИ, КНС, БиКМОП, БГТ, FOM

Для цитирования: Торина Е. М., Кочемасов В. Н., Сафин А. Р. Транзисторы для твердотельных СВЧ-переключателей (обзор) // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 3. С. 6–31. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-6-31

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования: грант РНФ № 21-79-10396.

Статья поступила в редакцию 04.02.2023; принята к публикации после рецензирования 10.04.2023; опубликована онлайн 29.06.2023

Transistors for Solid-State Microwave Switches (A Review)

Elena M. Torina^{1, 2}, 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. The characteristics of solid-state microwave switches are subject to different requirements depending on the application area and technical problems to be solved. No versatile solution exists that could satisfy all requirements at once. The desire to improve the parameters of switches has led to the emergence of devices based on various technologies. In order to elucidate the current trends and future prospects in the field of switch technologies, semiconductor devices that form the basis of switch circuits should be considered.

Aim. To review transistor types used in solid-state switches.

Materials and methods. The search and selection of literature sources for review was based on the chronological principle. The search depth for considering the parameters of finished components was no more than 10 years, for considering technologies and structural solutions – more than 10 years. This choice was explained by our desire to trace the history of development and approaches to the creation of semiconductor devices that have led to the emergence of the modern component base. The final array of sources comprised scientific publications presenting factual information on the objects under consideration.

Results. The types, structures, materials, characteristics and manufacturing technologies of transistors used in switches are considered. The achievable parameters of the switches based on the considered devices are presented.

Conclusion. The choice of a particular transistor type for switches depends on the requirements for the parameters and performance characteristics of the final device. At present, transistor solutions for switches are dominated by field-effect transistors (FETs) of various types: GaAs and GaN transistors with a high electron mobility (HEMT) and Si CMOS FETs implemented by standard as well as silicon-on-insulator and silicon-on-sapphire technologies. The conducted literature review has revealed prospects for the development of technologies based on BiCMOS heterojunction bipolar transistors.

Keywords: solid-state switches, HEMT, CMOS, SOI, SOS, BiCMOS, HBT, FOM

For citation: Torina E. M., Kochemasov V. N., Safin A. R. Transistors for Solid-State Microwave Switches (A Review). Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 3, pp. 6–31. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-6-31

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

Acknowledgment: RSF grant no. 21-79-10396.

Submitted 04.02.2023; accepted 10.04.2023; published online 29.06.2023

Введение. Твердотельные переключатели нашли широкое применение в ВЧ- и СВЧ-технике. В настоящее время они являются одними из самых распространенных радиотехнических устройств [1], к которым предъявляются разные требования. Так, радиолокационные приложения обычно требуют возможности коммутации сигналов довольно большой мощности. В современных системах беспроводной связи

более приоритетными являются требования к скорости переключения, миниатюризации конечного устройства и многоканальности [1–6].

В качестве активных элементов твердотельные СВЧ-переключатели используют в основном *pin*-диоды [6] и полевые транзисторы (ПТ) [1–5, 7–10]. В литературе можно найти результаты разработок переключателей и на других полупроводниковых активных элементах, показыва-

ющих неплохие характеристики, но пока что они не представлены в коммерческих устройствах.

Отдельно стоит отметить переключатели на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС), объединивших некоторые достоинства полупроводниковых и релейных устройств. Переключатели на МЭМС проигрывают транзисторным и диодным решениям по скорости переключения сигналов и мощности управления. Кроме того, у МЭМС-устройств есть ограничение на количество циклов переключения. Однако по уровню вносимых потерь, максимальной частоте коммутируемых сигналов и значению Figure of merit ($FOM = R_{on} \cdot C_{off}$) переключатели на МЭМС имеют существенные преимущества [11, 12].

Данная статья посвящена ПТ, используемым в переключателях. Цель работы – оценить место твердотельных переключателей на транзисторах среди твердотельных переключателей; оценить характеристики существующих на рынке приборов; рассмотреть технологии изготовления транзисторов и используемые полупроводниковые материалы. Для того чтобы понять, в каких случаях при выборе типа переключателя следует обращаться к решениям на транзисторах, кратко сравним их свойства с переключателями на *pin*-диодах [1–10, 13–17]:

- технологии ПТ проще и дешевле *pin*-диодных с точки зрения интегрируемости системы на кристалле;
- с точки зрения отвода тепла *pin*-диоды оказываются удобнее ввиду возможности отвода тепла от *i*-слоя вертикальной структуры;
- с точки зрения скорости переключения решения на ПТ выигрывают у *pin*-диодов за счет управления носителями только одного типа;
- значение тока управления ПТ на несколько порядков меньше, чем у *pin*-диодов, что позволяет упростить источники питания схемы;
- с точки зрения диапазона рабочих частот, с одной стороны, ПТ позволяют добиться более широкого диапазона рабочих частот и могут работать на постоянном токе, в то время как *pin*-диоды имеют ограничение по нижней частоте; с другой стороны, допустимые предельные частоты *pin*-диодов выше;
- с точки зрения вносимых потерь характеристики ПТ оказываются хуже *pin*-диодных, за

счет большего значения сопротивления во включенном состоянии;

– в момент коммутации может происходить искажение радиочастотного сигнала в виде паразитного видеоимпульса, наложенного на полезный сигнал. Величина этих искажений характеризуется высотой паразитного импульса (*video transients*). Существенным преимуществом ПТ, особенно GaAs-транзисторов с повышенной подвижностью электронов (*High Electron Mobility Transistor* – *HEMT*), является очень малое значение высоты паразитного видеоимпульса. Его амплитуда обычно составляет не более 150 мВ, в то время как устройства на *pin*-диодах имеют амплитуду видеоимпульсов порядка единиц вольт. Отметим, что переключатели на МЭМС имеют величину видеоимпульса еще на порядок меньше, чем переключатели на ПТ;

– *pin*-диоды обеспечивают более высокую по сравнению с ПТ допустимую мощность за счет большей толщины *i*-слоя по сравнению с длиной канала транзистора;

– среди твердотельных устройств наибольшие значения коэффициента интермодуляционных искажений третьего порядка характерны для переключателей на GaN *HEMT*-транзисторах и Si *pin*-диодах. В этих устройствах значение *IP3* может превышать 70 дБм, что свидетельствует об их высокой линейности. Отметим также, что у переключателей на МЭМС достижимые значения *IP3* могут быть более 95 дБм.

Таким образом, можно сказать, что для переключателей и *pin*-диодов, и транзисторы имеют свои преимущества. Далее рассматриваются только свойства переключателей на транзисторах. Основная часть статьи посвящена ПТ, так как именно они занимают большую часть рынка транзисторных переключателей. В первой части статьи приведены несколько примеров схем переключателей на ПТ, представленных на рынке радиотехнических приборов, и их основные характеристики. Подробный обзор этих переключателей представлен в [2–5, 7–10]. Числовые значения характеристик существующих на рынке устройств отражают состояние переключателей на транзисторах на данный момент. Следующие части статьи посвящены технологиям транзисторов и достижимым лабораторным значениям характери-

стик приборов. Как правило, научные разработки направлены на совершенствование конкретного параметра конечного прибора, который может быть и недостижим при серийном производстве. Однако рассмотрение научных результатов позволяет оценить тенденции развития рынка переключателей. В разделе "Общие сведения" обобщены основные особенности ПТ, позволяющие использовать их в переключательных устройствах. Далее рассмотрены два основных вида ПТ, используемых в переключателях: ПТ с управляющим переходом (ПТУП) и на основе структуры металл-окисид-полупроводник (МОП ПТ). Рассмотрены структуры, материалы, технологии изготовления и достижимые параметры переключателей на этих ПТ. Далее рассматриваются более редкие, но демонстрирующие неплохие характеристики SiGe биполярные транзисторы с гетеропереходом (БГТ).

Переключатели на основе ПТ. Как отмечалось ранее, переключателям на ПТ свойственны низкие токи управления. При этом они способны коммутировать довольно большие мощности, что делает их применение особенно привлекательным в мобильной телефонии, где постоянно растут требования к объему передаваемых данных [2–6]. Переключатели на ПТ

изготавливаются как в интегральном, так и в модульном исполнении. Заметим, что в отличие от *pin*-диодных устройств в случае ПТ сначала появились интегральные переключатели и лишь затем отдельные модульные изделия. При этом модульные устройства на МОП-структурах практически не выпускаются [7–10].

ПТ принято делить на два больших класса: с ПТУП и на основе МОП-структуры. Первый класс делится на транзисторы с управляющим *p-n*-переходом (Junction-gate Field-Effect Transistor – JFET), с переходом Шоттки (Metal-Semiconductor Field-Effect Transistor – MESFET) и наиболее распространенные в переключателях ПТ с повышенной подвижностью электронов (High Electron Mobility Transistor – HEMT). Сейчас наиболее часто изготавливаются переключатели на основе GaAs HEMT и GaN HEMT. Комплементарные МОП-транзисторы в переключателях используются на основе кремния и различаются технологией изготовления: стандартная (*bulk*) технология и усовершенствованные технологии "кремний на изоляторе" (КНИ) (Silicon-On-Insulator – SOI) и "кремний на сапфире" (KHC) (Silicon-On-Sapphire – SOS). У всех типов транзисторов есть свои преимущества для использования в переключателях (рис. 1).

Существует большое количество возможных вариантов построения схем переключателей

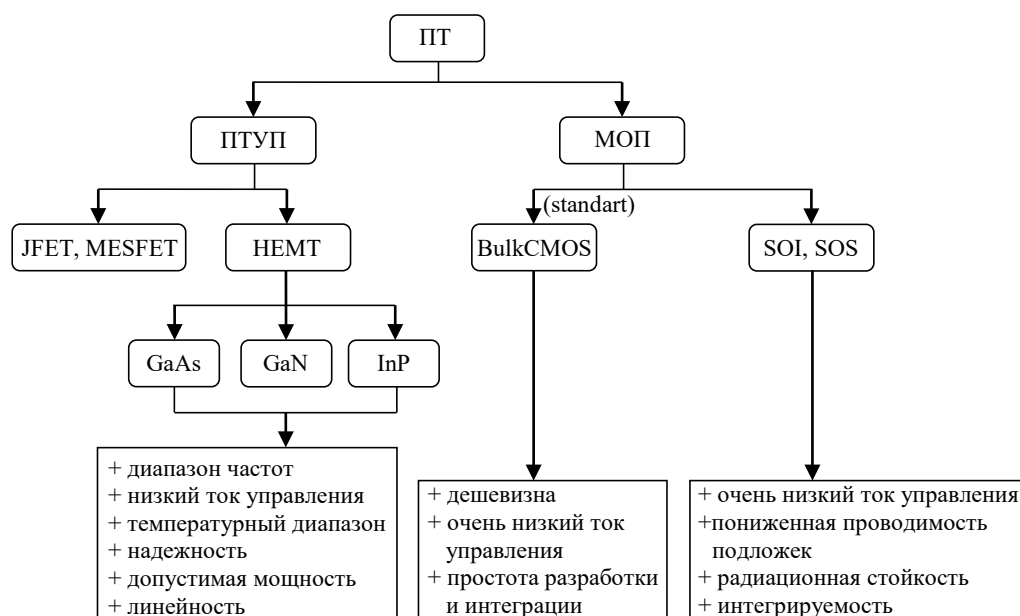


Рис. 1. Классификация переключательных ПТ, наиболее часто используемых в коммерческой реализации

Fig. 1. Classification of switching field-effect transistors most commonly used in commercial implementation

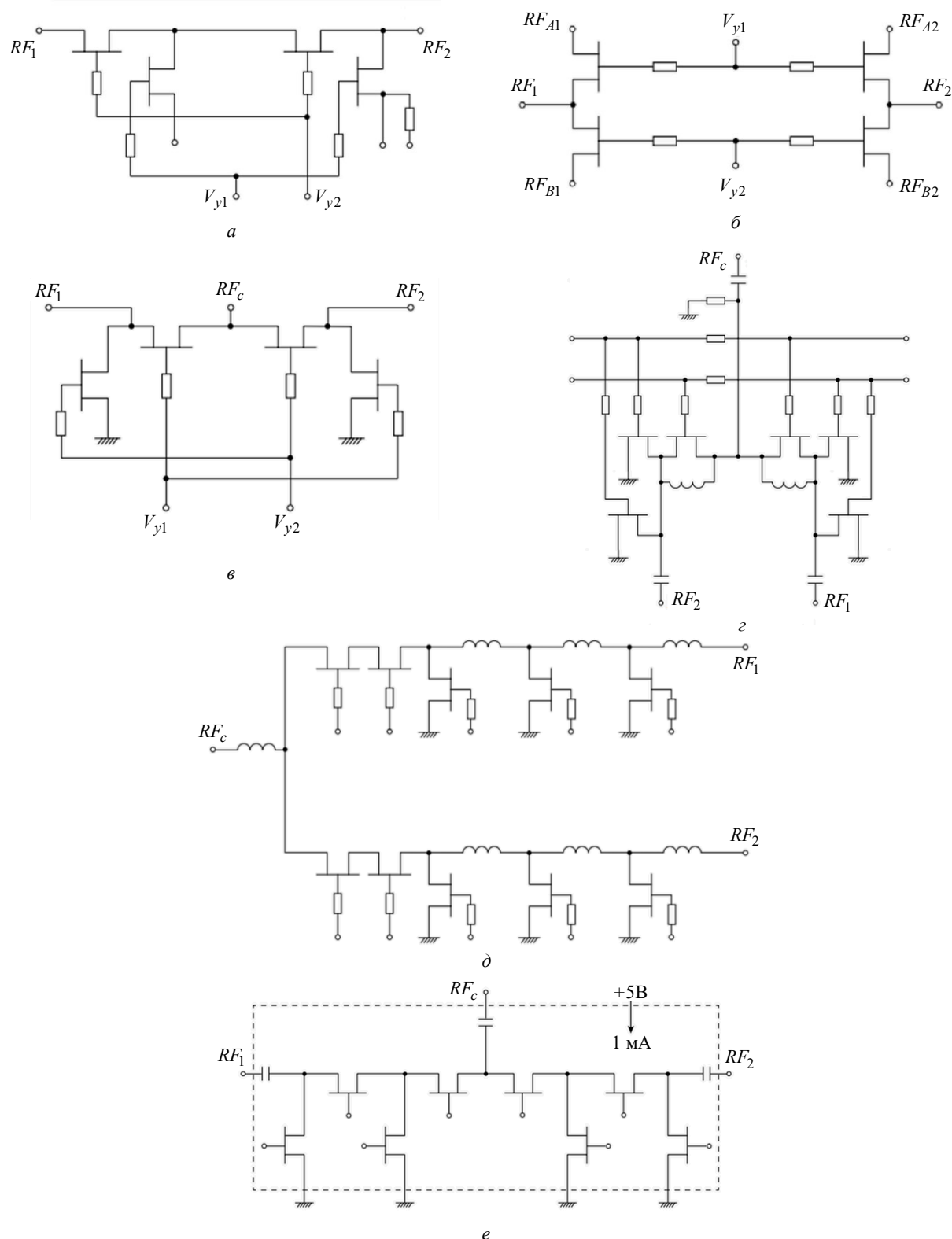


Рис. 2. Упрощенные принципиальные схемы переключателей на GaAs HEMT-транзисторах: а – модель MASW6020G (SPST), компания MACOM; б – модель CHS5104-99F (SPDT), компания UMS; в – модель MASW2040 (DPDT), компания MACOM; на GaN HEMT-транзисторах: г – CHS8618-99F (SPDT), компания UMS; д – компания Plextek RFI (SPDT); на основе кремниевых технологий КМОП: е – модель ADR5160 (SPDT), компания Analog devices

Fig. 2. Simplified circuits of switches based on GaAs HEMT transistors: а – model MASW6020G (SPST), MACOM; б – model CHS5104-99F (SPDT), UMS; в – model MASW2040 (DPDT), MACOM; based on GaN HEMT transistors: г – CHS8618-99F (SPDT), UMS; д – Plextek RFI (SPDT); based on silicon CMOS: е – model ADR5160 (SPDT), Analog devices

Табл. 1. Параметры переключателей на ПТ [2, 4]

Tab. 1. Parameters of FET switches [2, 4]

Компания	Модель	Структура ПТ	Тип	Диапазон частот, ГГц	Допустимая мощность ($P_{\text{доп}}$), Вт	Вносимые потери (IL), дБ	Развязка (Iso), дБ	Время переключения ($T_{\text{п}}$), нс
MACOM	MASW6020G [4]	GaAs HEMT	SPST	0...6.0	34	0.8...2.5	30...11	10
UMS	CHS5104-99F [2]	GaAs HEMT	SPDT	0...4.0	<2.0	0.25...0.5	38...20	–
MACOM	MASW2040 [2]	GaAs HEMT	DPDT	0...2.0	<2.5	<0.4...0.6	>25...15	–
UMS	CHS8618-99F [2]	GaN HEMT	SPDT	6.0...18.0	16	1.3	34	–
Plextek RFI	[2]	GaN HEMT	SPDT	0...20	–	0.75...1.3	45	–
Analog devices	ADR5160 [4]	КНИ	SPDT	0.7...4.0	49.7	0.7...0.9	53...35	1200
pSemi	PE42524 [4]	КНС	SPDT	0.01...40	<1.8	0.6...5.5	84...33	55

на ПТ, позволяющих оптимизировать их параметры, например: диапазон частот, время переключения, допустимый уровень коммутируемой мощности и пр. (табл. 1). Упрощенные схемы этих переключателей используют разные варианты включения транзисторов (рис. 2).

Общие сведения. Любой ПТ во включенном и выключенном состояниях можно представить [13] как сопротивление $R_{\text{он}}$ или емкость $C_{\text{офф}}$ между стоком и истоком транзистора соответственно (рис. 3, а, б). Ток стока ($I_{\text{с}}$) проходит по каналу, формируемому между областями стока и истока транзистора, а его значение и скорость изменения в зависимости от изменения напряжения сток–исток $U_{\text{с-и}}$ управляются напряжением на затворе $U_{\text{з-и}}$. Для переключателей важно, чтобы в открытом состоянии сигнал проходил с входа на выход без изменения гармонического состава, а в закрытом – прохождение сигнала должно быть полностью заблокировано, т. е. нужно, чтобы ПТ вел себя как управляемое сопротивление. Такая работа ПТ характерна для крутой области выходных вольт-амперных характеристик (ВАХ). Характер зависимости $I_{\text{с}}(U_{\text{с-и}})|_{U_{\text{з-и}}=\text{var}}$ для транзистора с каналом n -типа аналогичен для всех типов рассматриваемых ПТ (рис. 3, в).

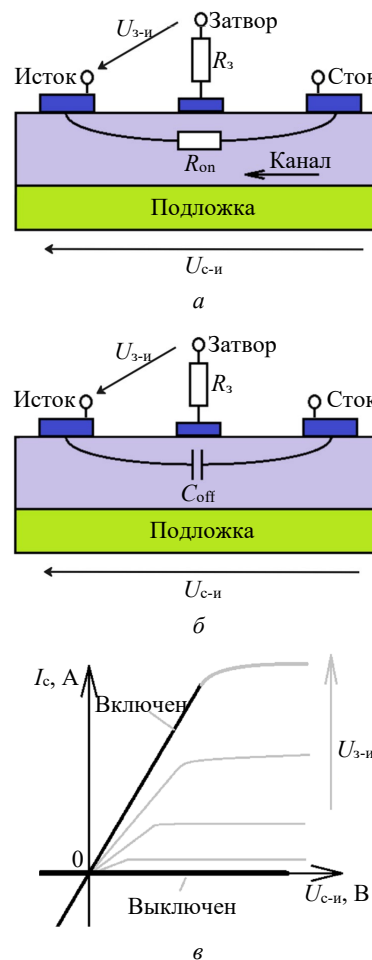


Рис. 3. Общий вид структуры планарного ПТ: а – во включенном состоянии; б – в выключенном состоянии; в – семейство выходных статических характеристик
Fig. 3. General view of the planar FET structure in the on (a) and off (b) states; family of output static characteristics (v)

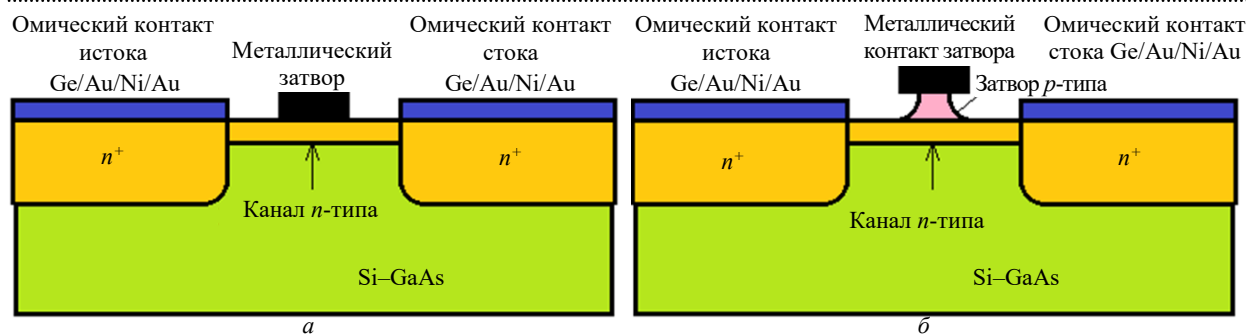


Рис. 4. Упрощенные структуры GaAs ПТ: а – MESFET; б – JFET

Fig. 4. Simplified structures of GaAs FETs: а – MESFET; б – JFET

ПТУП. Принцип работы, виды, структура. Арсенид-галлиевые интегральные схемы переключателей с ПТ с управляющим p - n -переходом (JFET) успешно использовались в прошлом веке, пока в 1966 г. не был представлен ПТ с барьером Шоттки [18]. Упрощенные структуры, отражающие принцип работы этих транзисторов, схожи друг с другом (рис. 4). Транзисторы с барьером Шоттки (MESFET) обладали большими быстродействием и линейностью выходных характеристик, меньшим уровнем шумов и были более мощными. Сформированный между стоком и истоком канал из легированного полупроводника пропускает ток стока, зависящий от приложенного между электродами сток–исток поля и управляющего напряжения на затворе [19]. Напряжение на затворе меняет ширину обедненного слоя в легированном полупроводнике, что, в свою очередь, меняет сопротивление канала.

Для переключателей рабочей является линейная часть выходной характеристики. При этом транзистор работает при сравнительно малых значениях напряжения сток–исток, т. е. носители движутся по каналу в слабом поле. Важной характеристикой переключателей является быстродействие, которое напрямую зависит от подвижности носителей. Подвижность электронов в GaAs в слабом поле значительно выше, чем в Si, поэтому в качестве полупроводникового материала транзисторов для переключателей чаще использовался именно арсенид галлия.

Реальная структура MESFET-транзистора представлена на рис. 5. Базовым материалом является подложка из GaAs. Буферный слой, обычно тоже арсенид-галлиевый, эпитаксиально выращивается на полуизолирующей под-

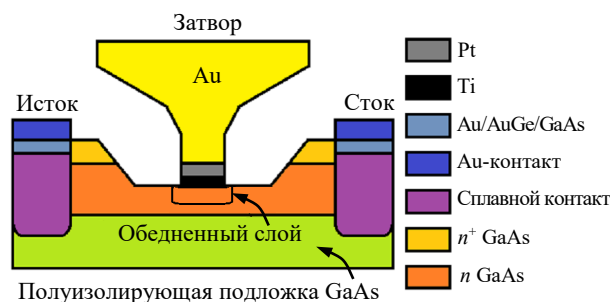


Рис. 5. Базовая структура GaAs ПТ с барьером Шоттки

ложке и служит для изоляции дефектов в подложке от рабочей части транзистора. Канал является тонким, слегка легированным проводящим слоем полупроводникового материала, эпитаксиально выращенным на буферном слое. Высоколегированные области, показанные на структуре, необходимы для обеспечения низкого омического сопротивления контактов транзистора [20].

Граничная и максимальная рабочие частоты определяются по формулам [19]

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{V_{\text{нас}}}{2\pi L}; f_{\text{max}} = \frac{f_T}{2} \sqrt{\frac{R_{\text{с-и}}}{R_3}}, \quad (1)$$

где τ – время пролета электронов через канал; $V_{\text{нас}}$ – напряжение насыщения; L – длина канала; $R_{\text{с-и}}$ – сопротивление между стоком и истоком; R_3 – сопротивление затвора.

На протяжении всей истории развития транзисторов требования к быстродействию и миниатюризации постоянно росли. Согласно (1) быстродействие ограничено временем пролета через канал и подвижностью носителей (скоростью насыщения), поэтому естественной мерой по совершенствованию приборов было

уменьшение длины затвора, что привело к существенным технологическим сложностям.

Улучшить переключательные свойства за счет уменьшения сопротивления во включенном состоянии R_{on} можно, уменьшая длину канала [19]. Однако такой подход оказался ограниченным: для эффективного управления током длина канала должна быть больше его глубины, что требует уменьшения физических габаритов кристалла, а малые размеры транзистора приводят к снижению их надежности [20]. Требовались новые структурные решения для транзисторов.

Дальнейшим развитием ПТУП стала разработка транзисторов на гетеропереходах, известных как транзисторы с повышенной подвижностью электронов или HEMT-транзисторы.

Создатель первого такого транзистора Такаши Мимура вспоминает [21], что принадлежал к группе разработки GaAs MESFET и работал над созданием арсенид-галлиевого МОП-транзистора, ожидая, что такой прибор окажется более быстродействующим по сравнению с кремниевыми структурами. Разработка такой структуры была осложнена тем, что в GaAs не происходило накопления и инверсии зарядов из-за высокой плотности поверхностных состояний.

В это время велись активные исследования в области совершенствования полупроводниковых структур, в частности гетеропереходов. За их ис-

следование и разработку наш соотечественник Ж. И. Алферов был удостоен Нобелевской премии. В 1979 г. была опубликована статья о разработанной в Bell Laboratories сверхрешетке на гетероструктурах. Именно она натолкнула Мимуру на идею использования эффекта поля для управления электронами на границе одиночного гетероперехода, состоящего из пары нелегированного GaAs и AlGaAs n -типа [21].

Впервые материал о HEMT-транзисторе был опубликован в 1980 г. [22], а первые устройства на GaAs HEMT были разработаны и представлены на международной конференции в 1983 г. Уже в 1987 г. коммерциализация HEMT значительно увеличилась, и HEMT начали заменять GaAs MESFET в спутниковых приемниках вещания. Так, например, транзисторы по технологии HEMT позволили уменьшить размер параболической антенны вдвое или более [21].

Гетероструктура первого HEMT-транзистора состояла из слоев нелегированного арсенида галлия и легированного кремнием $Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0.32$), где x – доля атомов галлия, замещенных атомами алюминия (рис. 6, а) [19]. Благодаря тому, что слои гетероперехода имеют разную ширину запрещенной зоны, на границе раздела структур электроны инжектируются из легированного электроном более широкозонного слоя в нелегированный узкозонный слой, образуя на

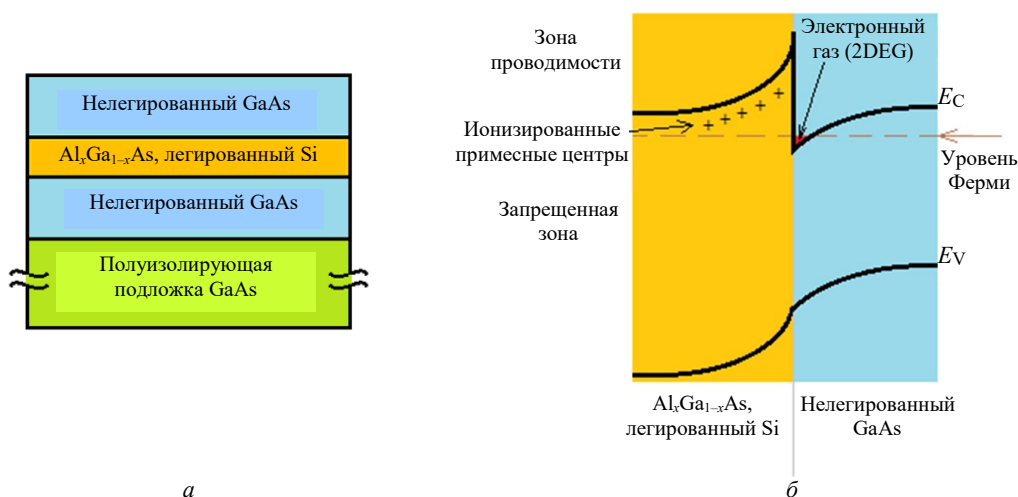


Рис. 6. Гетеропереход первого HEMT-транзистора: а – урощенная структура; б – энергетическая диаграмма (E_C – дно зоны проводимости, E_V – потолок валентной зоны)

Fig. 6. Heterojunction of the first HEMT transistor: а – truncated structure; б – energy diagram (E_C – bottom of the conduction band; E_V – top of the valence band)

границе область, где уровень Ферми находится непосредственно в зоне проводимости. Там образуется так называемый двумерный электронный газ (область 2DEG на рис. 6, б). Эта область обладает большей подвижностью электронов. Повышение подвижности связано с пространственным разделением между электронами и их исходными донорными примесями [22]. НЕМТ-транзисторы позволили повысить быстродействие, усиление и понизить коэффициент шума относительно своих предшественников MESFET-транзисторов.

Выращивание гетероструктур – технологически довольно сложный процесс из-за несоответствия постоянных решеток двух материалов, хотя визуально структуры кажутся аналогичными ПТУП с переходом Шоттки (рис. 5, 7). Существует 2 основных подхода к созданию НЕМТ-структур [20].

В первом случае слой одного из материалов делается настолько тонким, что его решетка буквально подстраивается (сжимается или растягивается), адаптируясь к постоянной решетке другого материала гетероперехода. В этом случае "адаптированный" материал будет находиться в напряжении, однако позволяет получить большую разницу запрещенных зон переходов. Транзисторы, выращенные таким образом, называются псевдоморфными или рНЕМТ (рис. 7, а). Именно они получили наиболее широкое применение в СВЧ-технике.

Другой способ – создание между слоями гетеропереходов буферного слоя, подобранного таким образом, что его решетка в достаточной степени согласуется с обоими слоями гетеропе-

рехода. Такая технология позволяет создавать метаморфные транзисторы или мНЕМТ (рис. 7, б). Метаморфные транзисторы хоть и реже используются в переключательных устройствах, особенно мощных, тем не менее имеют свои преимущества. В частности, с помощью них удастся создавать более высокочастотные устройства [23].

Технологические процессы изготовления псевдо- и метаморфных транзисторов мало отличаются друг от друга. Структура выращивается на подложке с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии или металлоорганического испарения. Следующий выше (рис. 7) буферный слой эпитаксиально выращивается на подложке для изоляции дефектов и создает гладкую поверхность, на которой происходит выращивание активных слоев транзистора. Создается активный канал и имплантируется изолятор, далее формируются омические переходы, осуществляется формирование углублений затвора и области "затвор–металл". После этого осуществляют травление истока и контактов, формируют воздушные мостики, переходные отверстия и обрабатывают обратную сторону подложки [20].

По мере эксплуатации первых моделей арсенид-галлиевых переключателей на ПТ выявился весьма существенный недостаток – большое время установления (T_{set}), многократно превышающее значения времени нарастания (T_r), спада (T_f), включения (T_{on}) и выключения (T_{off}) из технических паспортов на эти изделия. Много усилий по преодолению

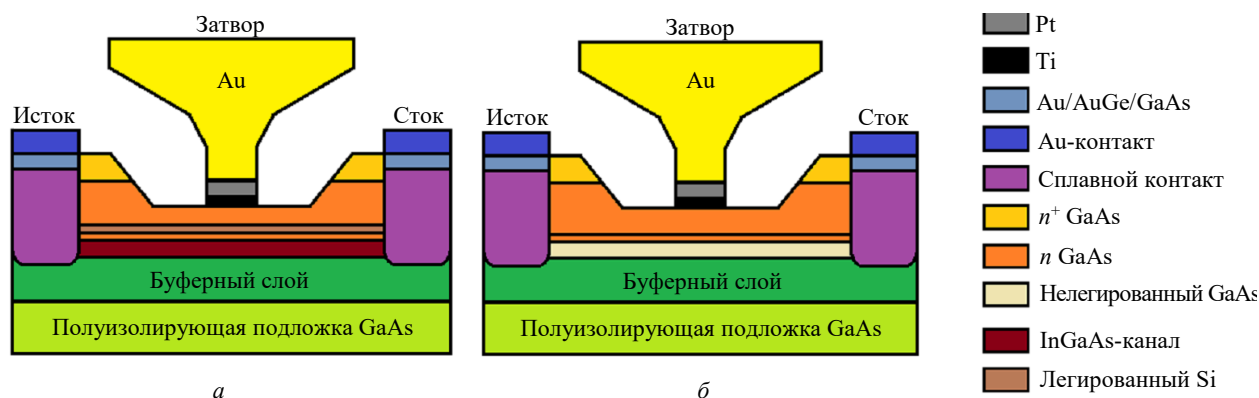


Рис. 7. Базовые структуры GaAs НЕМТ: а – псевдоморфного; б – метаморфного

Fig. 7. Basic structure of pseudomorphic (a) and metamorphic (b) GaAs NEMT

этого недостатка было приложено компанией MACOM, которой в конце концов удалось разработать модифицированный рНЕМТ-процесс, решивший проблему [2–5, 7–10]. Так, в переключателях, изготовленных с применением модифицированного рНЕМТ-процесса, время установления было улучшено с сотен наносекунд до десятков наносекунд [2–5].

Эквивалентные схемы. Построение эквивалентных схем ПТ – задача сложная. Часто она решается для каждого устройства индивидуально на основе измеренных экспериментально значений и параметров производителя: S -параметров; характеристик постоянного тока; предельных и эксплуатационных значений токов, напряжений, коэффициента усиления, частот и пр. Обычно эти данные можно найти в техническом паспорте конкретного прибора.

Несмотря на сложность, при проектировании нелинейных СВЧ-устройств, в том числе

переключателей, бывает необходимо пользоваться нелинейными моделями активных приборов (эквивалентными схемами). При переключении сигналов малой мощности достаточно воспользоваться малосигнальной эквивалентной схемой для расчета важнейших параметров, влияющих на показатели качества переключателей (в частности, рабочие частоты, R_{on} , C_{off}). При переключении сигналов большой мощности используют эквивалентные схемы в режиме большого сигнала.

Существует большое количество моделей транзисторов. В зависимости от пользователя требования к этим моделям могут быть разные, иногда противоречащие друг другу. Например, разработчикам компонентной базы важно точное соответствие модели физическим процессам в кристалле. Для разработчиков интегральных схем важна простота и эффективность. Для разработчиков систем автоматизированного

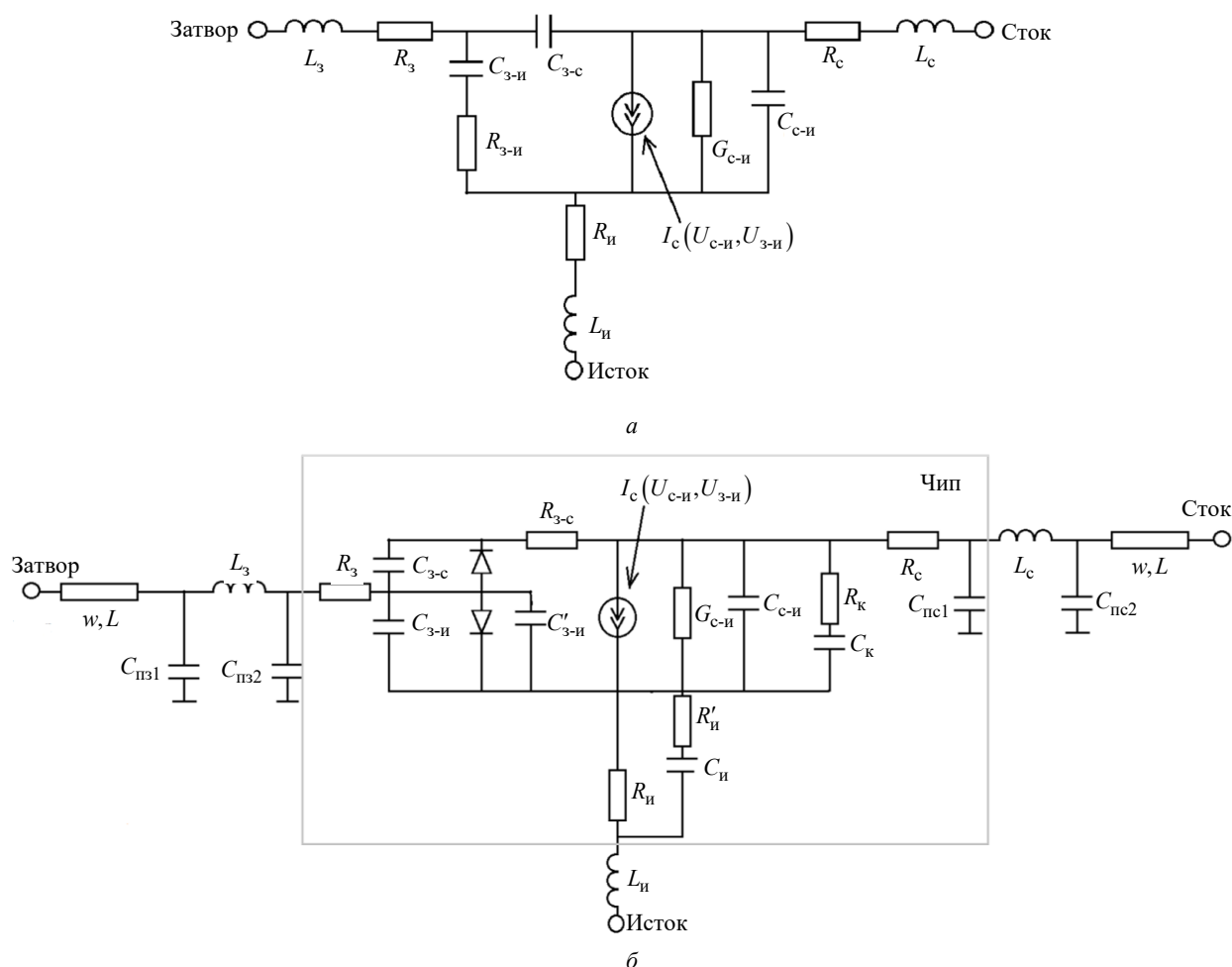


Рис. 8. Эквивалентные схемы НЕМТ-транзистора: а – малосигнальная; б – модель Чалмерса для большого сигнала

Fig. 8. Equivalent circuits of a HEMT transistor: а – low-signal; б – Chalmers model for a large signal

проектирования (САПР) важным параметром является совместимость новой модели с предыдущими версиями и т. д. [24]. При разработке переключателей важно, чтобы эквивалентные схемы были достаточно просты для анализа, но при этом хорошо согласовывались с работой прибора в двух состояниях: открытом и закрытом. Рассмотрим примеры моделей НЕМТ-транзисторов.

Малосигнальная схема, которая может быть использована в качестве модели НЕМТ-транзистора, имеет ряд упрощений (рис. 8, а) и применима только для рабочего режима транзистора при определенном управляющем сигнале [25]. Схема большого сигнала учитывает разные режимы транзистора и нелинейность его характеристик. В качестве примера взята модель Чалмерса (рис. 8, б). Данная схема учитывает пробойные явления, изменение режима и температуры прибора [26, 27].

В малосигнальной схеме $L_3, L_c, L_n, R_3, R_c, R_n$ – индуктивности выводов и сопротивления затвора стока и истока соответственно; R_{3-n}, C_{3-n} – сопротивление и емкость между затвором и истоком; G_{c-n}, C_{c-n} – проводимость и емкость между стоком и истоком; $I_c(U_{c-n}, U_{3-n})$ – зависящий от ширины канала ток стока. Схема большого сигнала дополнена паразитными ($C_{пз1,2}, C_{пс1,2}$), частотно-зависимыми элементами и $p-n$ -переходами между затвором, стоком и истоком, что позволяет учитывать пробойные явления.

Материалы НЕМТ-транзисторов и достижимые параметры переключателей на них. На данный момент на рынке можно встретить переключатели на НЕМТ-транзисторах из разных полупроводниковых материалов. Как было указано ранее, первые транзисторы с повышенной подвижностью электронов были выполнены из GaAs. Однако позже для изготовления приборов разработчики стали использовать и другие материалы. Для создания гетероструктур используются соединения $A^{II}B^{VI}$, $A^{III}B^V$ и их твердые растворы. Для переключателей преимущественно применяются соединения GaAs, GaN и InP [2–5, 7–10, 28].

GaAs и InP являются узкозонными материалами со сходными свойствами; GaN же является

существенно более широкозонным материалом [23], имеет существенно более высокое значение теплопроводности и критического поля.

Сравнивая используемые узкозонные материалы, можно сказать, что InP имеет преимущества перед GaAs по изоляционным свойствам, значению $FOM = R_{on} \cdot C_{off}$ и быстродействию. Этот материал более привлекателен при использовании для оптоэлектронного переключения, требующего совместимости с оптическими устройствами на основе InP. Однако у него есть и недостатки. Во-первых, GaAs выдерживает более высокую мощность, по сравнению с InP. Во-вторых, индий-фосфорные устройства более дорогие в изготовлении, имеют более хрупкие подложки. По этой причине GaAs является более привлекательным для использования в высокочастотных цифровых приложениях.

Для переключателей в качестве материала транзистора часто используется GaN. По сравнению с рассмотренными ранее узкозонными материалами GaN является широкозонным, ширина запрещенной зоны у него более чем в 2 раза шире. Следует выделить ряд ключевых факторов, делающих характеристики GaN НЕМТ специфическими [29]:

- рассеиваемая мощность больше в 10 раз, чем у GaAs;
- рабочая амплитуда напряжения выше в 5 раз, а тока в 2 раза, чем у GaAs;
- высокая теплопроводность;
- сильные пьезоэлектрические свойства;
- высокий ток затвора;
- высокая температура кристалла;
- высокая надежность.

GaN НЕМТ обычно выращивается либо на Si, либо на SiC, реже на GaN и алмазе. В зависимости от подложки характеристики транзистора могут отличаться. Так, SiC обладает существенно большей теплопроводностью, чем чистый Si, поэтому транзисторы GaN-on-SiC обладают меньшими потерями, миниатюрны и предпочтительны для получения лучших характеристик переключателя. Однако кремниевые подложки дешевле, а сочетание высокого уровня плотности мощности и приемлемой изоляции позволяют GaN-on-Si также найти свое применение.

Табл. 2. Достижимые параметры переключающих HEMT различных материалов

Tab. 2. Achievable parameters of switching HEMTs of various materials

Параметр	Материал			
	GaAs [2–5, 23, 28, 32]	GaN [2–5, 28, 30]	InP [2–5, 28]	InGaAs [31]
FOM (2005), фс	400	579	282	–
FOM (2018), фс	42	164	–	110.3
IL, дБ	0.3	<0.7	2.5	2.2
Iso, дБ	>29	>20	5	17.4
Freq _{max} , ГГц	85	150	170	<330

Возможная плотность мощности GaN на обоих типах подложек превышает возможность транзисторов на узкозонных материалах. Это происходит потому, что подвижность электронов, а значит, и их скорость насыщения у GaN выше. Соответственно, выше и возможное значение плотности тока. Кроме того, кристалл меньше греется при том же значении рассеиваемой мощности [29].

Однако сопротивление во включенном состоянии (R_{on}) у GaN-устройств выше, чем у InP и GaAs, что дает преимущества узкозонным материалам по показателю качества FOM. На малых мощностях изоляционные свойства переключателя на GaN HEMT хуже. Однако при повышении рабочей мощности и температуры изоляционные свойства устройств из InP и GaAs ухудшаются, в то время как свойства GaN остаются практически неизменными. На больших мощностях GaN HEMT проявляет уже лучшие по сравнению с узкозонными материалами свойства [28].

Следует также отметить встречающийся в литературе материал InGaAs. Это полупроводниковое соединение интересно тем, что изменяет свои физические и химические свойства, такие как ширину запрещенной зоны, постоянную решетки, максимальную температуру и пр., при разных соотношениях Ga и In друг к другу. В литературе есть примеры переключателей с неплохими достижимыми параметрами на основе InGaAs HEMT [30].

Достижимые характеристики переключателей на HEMT из GaAs в настоящее время позволяют добиться минимального значения FOM. Максимальная частота для коммерчески реализуемых изделий у переключателей на GaN HEMT, однако экспериментальные образцы соединений индия позволяют добиться более вы-

соких значений F_{max} . Переключатели на HEMT демонстрируют низкий уровень вносимых потерь и хорошую развязку. Следует отметить, что по мере развития технологий эти характеристики быстро улучшаются (табл. 2).

Кремниевые МОП-транзисторы. Комплиментарные МОП-технологии (КМОП) находят очень широкое применение в различных приложениях. В переключающих устройствах они заняли свою нишу, благодаря постоянному развитию систем беспроводной связи. Например, мобильные телефоны GSM превратились из однодиапазонной системы TDMA, требующей только переключателя SPDT, в систему связи, объединяющую до четырех диапазонов GSM и WCDMA. Разработка новых стандартов связи постоянно усложняет структуру антенных переключателей, требуя все большее количество выходов. Так, в стандартах 4G число портов переключателей достигает 30. Учитывая огромный коммерческий спрос на устройства с поддержкой новых стандартов связи, можно ожидать, что потребность в антенных переключателях мобильной связи и приемо-передающих модулях РЛС будет исчисляться миллиардами штук в год. Для удовлетворения такого спроса нужна достаточно дешевая технология изготовления переключателей, которая к тому же будет легко интегрироваться с другими функциональными блоками конечного устройства. При этом переключатели должны быть многопозиционными и обладать приемлемыми характеристиками (линейностью, развязкой и пр.). В радиолокации приемо-передающие модули включают в себя не только переключатели, но и управляемые аттенюаторы, фазовращатели и усилители, что повышает значимость интегрируемости переключателей. Этим требованиям в полной мере отвечают КМОП-изделия [2–5, 7–10, 33, 34].

Появившиеся в конце середины прошлого века переключатели на КМОП ПТ имеют исключительно низкую стоимость, просты в разработке и отличаются чрезвычайно низкими токами потребления [7–10]. Рассмотрим подробнее принцип работы МОП-структуры и современные технологии КМОП, применяемые в переключателях.

Принцип работы и структуры МОП ПТ. МОП-структура представляет собой соединение металла, диэлектрика (оксид) и легированного полупроводника (рис. 9, а). Функционирование приборов на ее основе связано с особенностями движения носителей при подаче на структуру напряжений различной полярности. Если подать напряжение таким образом, что электрическое поле будет направлено, например, от полупроводника p -типа к металлу, то в приконтактной области полупроводник–оксид начнут собираться основные для полупроводника носители – дырки, повышенная концентрация которых вызовет изменение объемного заряда в полупроводнике, который будет скомпенсирован зарядом противоположного знака в металле. Это режим обогащения. Если изменить полярность напряжения, то дырки начнут вытягиваться из приконтактной области, оставляя за собой отрицательно заряженные акцепторные центры в полупроводнике. Так как ионизированные центры примеси являются неподвижными, то и область, занимаемая объемным зарядом в полупроводнике, будет расширяться. Это режим обеднения. При дальнейшем увеличении электрического поля к приконтактной области начнут притягиваться неосновные для данного типа полупроводника подвижные носители – электроны, вызывая режим инверсии.

Работа различных полупроводниковых приборов основана на разных режимах МОП-

структур. Транзисторы на основе МОП-структур при открывании используют режим инверсии для формирования в подложке одного типа канала другого типа проводимости. Энергетическая диаграмма в этом режиме искажается таким образом, что уровень Ферми в приконтактной области оказывается ближе к дну зоны проводимости в полупроводнике p -типа (рис. 9, б) и потолку валентной зоны в полупроводнике n -типа. Рассмотрим подробнее особенности и основные характеристики используемых в переключателях МОП-транзисторов.

Для создания стандартного МОП-транзистора в МОП-структуру добавляются сильнолегированные другим типом примеси области, образующие сток и исток транзистора. Если используется подложка p -типа, то области стока и истока будут n^+ -типа (рис. 10, а). При подаче достаточного напряжения с затвора на исток в МОП-структуре обеспечивается режим инверсии. Повышенная концентрация неосновных для материала подложки подвижных носителей формирует тонкий канал между сильнолегированными стоком и истоком, выполненными из материала с другим, относительно подложки, типом проводимости. Это позволяет при подаче напряжения между стоком и истоком обеспечить протекание во внешней цепи тока. Сила тока будет регулироваться в зависимости от величины вертикального поля МОП-структуры, тем самым позволяя транзистору работать в качестве управляемого напряжением на затворе линейного сопротивления при относительно малых значениях напряжения на стоке.

Зависимость тока стока от напряжения между затвором и истоком в МОП ПТ с наведенным n -каналом находится в первом квадранте проходной вольт-амперной характери-

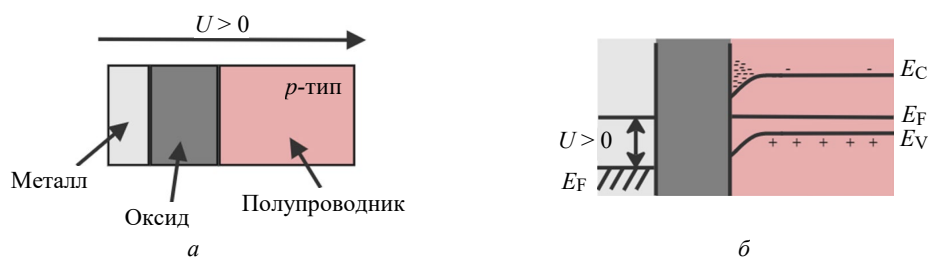


Рис. 9. Принцип работы МОП-структуры: а – структура металл–оксид–полупроводник; б – энергетическая диаграмма МОП-структуры в режиме инверсии

Fig. 9. Operation principle of the MOS structure: а – metal-oxide-semiconductor structure; б – energy diagram of the MOS structure in the inversion mode

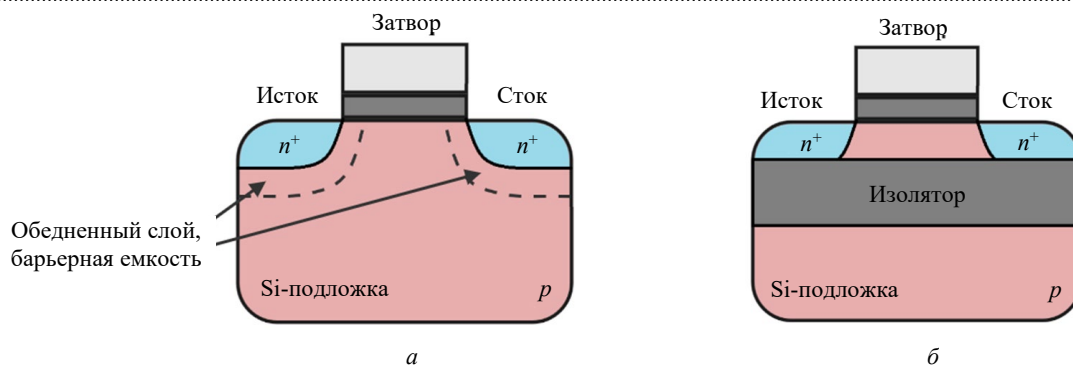


Рис. 10. Упрощенная структура МОП-транзистора: *a* – по стандартной технологии выращивания; *б* – по технологии "кремний на изоляторе"

Fig. 10. Simplified structure of the MOSFET: *a* – according to the standard growing technology; / *б* – according to the technology "silicon on the insulator"

стики $I_c(U_{з-и})$. При введении между стоком и истоком тонкого слоя легированного в соответствии с типом канала полупроводника формируется структура МОП ПТ со встроенным каналом. В таком транзисторе управляющее напряжение $U_{з-и}$ может быть разных полярностей. Отрицательное напряжение, т. е. приложенное от истока к затвору для n -канальных структур, может увеличиваться по модулю до некоторого значения $U_{отс}$. При достижении $U_{з-и} = U_{отс}$ к МОП-границе начнут притягиваться подвижные носители противоположного типа, переключая канал между стоком и истоком.

Технологии изготовления КМОП ПТ. Наиболее распространенной и дешевой является стандартная технология изготовления КМОП-структур, называемая в англоязычной литературе bulk CMOS. Большая часть электронных устройств сегодня создана по стандартной КМОП-технологии – хорошо отработанной, изученной, с низкими производственными затратами и высокой технологичностью [35]. Поэтому эта технология остается привлекательной и распространенной в технических приложениях, требующих массовости производства, даже если технические характеристики таких устройств будут проигрывать характеристикам устройств, построенных по другим технологиям.

Для создания интегральных схем часто используются комплементарные пары транзисторов на кремниевой подложке, построенные по стандартной технологии (рис. 11, *a*). Материалы областей стока и истока имеют повышенную концентрацию основных носителей, в

сравнении с материалом подложки, поэтому обедненный слой сосредоточен в основном в подложке (рис. 10, *a*), образуя барьерную емкость, т. е. каждый переход создает нежелательную паразитную емкость, причем при уменьшении линейных размеров устройства емкости будут возрастать. Это обстоятельство значительно ухудшает быстродействие устройств, построенных по стандартной КМОП-технологии, так как при переключении транзисторов много времени тратится на накопление или рассасывание заряда в обедненных областях, иными словами, на заряд паразитных емкостей. Другим недостатком стандартной КМОП-технологии является высокая проводимость кремниевых подложек, что ухудшает изоляционные свойства.

Для переключателей недостатки стандартной КМОП-технологии затрудняют создание устройств с широкой полосой частот, низкими вносимыми ослаблениями, высокими развязками и малым временем коммутации. Низкое значение напряжения пробоя не позволяет таким переключателям работать с высокой входной мощностью [7–10]. Для преодоления указанных недостатков применяются различные схемотехнические решения. Например, для повышения развязки в переключателях могут быть использованы эффекты компенсации сигнала при дифференциальном включении транзисторов [37]. Следует тем не менее отметить, что, несмотря на указанные недостатки, переключатели на стандартной КМОП-технологии все же выпускаются с достаточно приемлемыми характеристиками [7–10, 33].

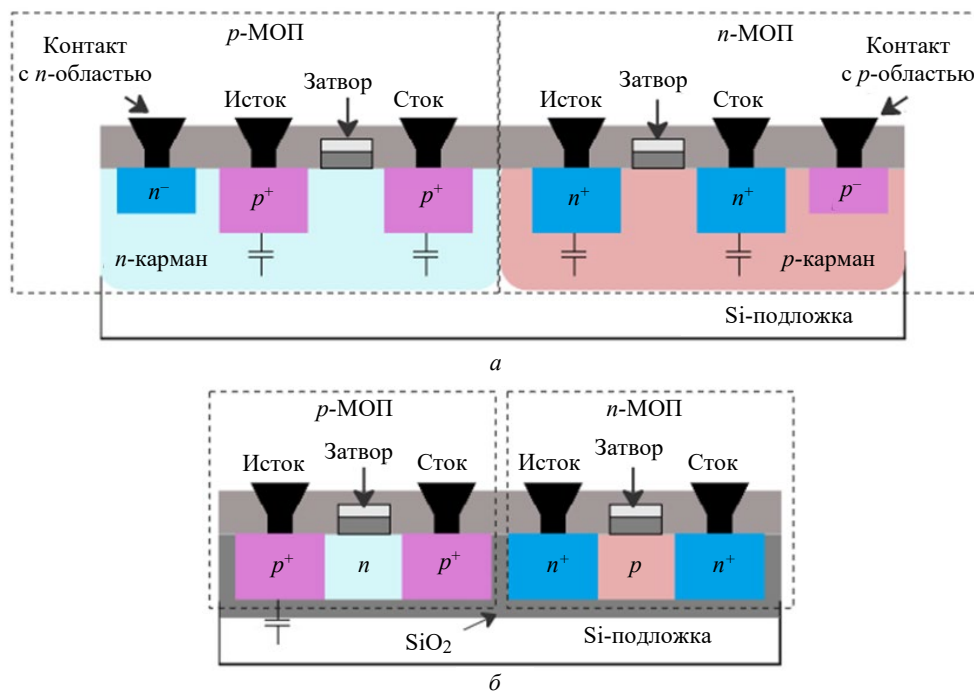


Рис. 11. Структуры комплементарных пар МОП-транзисторов: а – по стандартной технологии; б – по технологии КНИ [35, 36]
 Fig. 11. Structures of complementary pairs of MOS transistors according to: а – standard technology; б – SOI technology [35, 36]

Для устранения указанных недостатков стандартной КМОП-технологии в конце прошлого века было предложено поместить слой изолятора между поверхностным слоем, в котором формируются структуры транзисторов, и монокристаллической подложкой. Упрощенная структура такого решения, получившего название КНИ, отличается от стандартной только наличием в подложке изолирующего слоя (см. рис. 10, б). КМОП-транзисторы, созданные по технологии КНИ, в англоязычной литературе называемой SOI, состоят как бы из отдельных островков, изолированных друг от друга и от подложки. В качестве изолятора может быть использован, например, оксид кремния SiO_2 (рис. 11, б).

Благодаря изоляции отдельных транзисторов паразитные емкости переходов хоть и не исчезают полностью, но уменьшаются в несколько раз, что позволяет увеличить быстродействие. В стандартной КМОП-технологии для развязки устройств на одной подложке вводятся специальные канавки с пониженной концентрацией примеси (рис. 11, а), что накладывает ограничение на уплотнение компонентов. Введение изолятора позволяет значительно увеличить развязку и уменьшить вносимые потери. Поскольку ограничений по изоляции практически нет, в устрой-

ствах, построенных по технологии КНИ, не требуется введение дополнительных канавок и возможно повышение плотности транзисторов в несколько раз, что способствует миниатюризации устройств [7–10, 35, 36].

В КМОП-структурах важным параметром является также емкость затвора, характеризующая изоляцию затвора и, как следствие, исключительную малость токов управления. При сравнении стандартной и КНИ-технологии КМОП ПТ отмечается, что емкость затвора транзисторов остается приблизительно постоянной для этих решений [35].

Другим вариантом реализации технологии КНИ является использование в качестве изолирующей подложки сапфира. Такая технология получила отдельное название КНС (SOS). Следует отметить, что идея введения изолятора в подложку КМОП-структур была предложена именно для использования сапфира еще в 1961 г. [7–10, 35]. КНС обладает преимуществами как перед стандартной КМОП-технологией, так и перед КНИ. Сохраняя все указанные преимущества построения структур на изоляторе, использование сапфировых подложек показывает лучшие высокочастотные характеристики, имеет более высокую линейность, лучшую радиационную стойкость и бо-

лее низкое энергопотребление, чем КНИ. Кроме того, КНС обладает лучшими изоляционными свойствами, чем КНИ, за счет наличия у последней паразитной поверхностной проводимости на границе раздела кремний–изолятор. Частично в КНИ этот недостаток решен введением дополнительного слоя, содержащего высокую плотность ловушек носителей, так называемый trap-rich layer (TR SOI) [36, 38].

При всех преимуществах технологии КНС КМОП производство устройств на ее основе столкнулось с трудностями. Основная проблема заключалась в том, что постоянные кристаллических решеток сапфира и кремния не совпадают, из-за чего выращивание на сапфире слоя кремния с допустимыми дефектами очень затруднено. Это являлось огромным препятствием для коммерциализации устройств КНС.

В 90-е гг. прошлого века Peregrine Semiconductors (pSemi) совместно с фирмой AKM Asahi Kasei Microsystems Corp. разработали технологию Ultra Thin Si (UTSi), которая значительно улучшила ситуацию. Суть технологии состоит в следующем: на сапфировой подложке эпитаксиально выращивается пленка кремния. В этот момент осажденный слой кремния имеет множество дефектов из-за несоответствия решеток. Далее внутри сформированного слоя имплантируются ионы кремния, разрушающие эффекты кристаллизации вблизи границы с сапфиром, что приводит к переходу кремния в аморфное состояние. После этого в окисленной атмосфере проводится термическая обработка для формирования пленки кремния с гораздо меньшим количеством дефектов путем рекристаллизации пленки аморфного кремния. Образовавшаяся в процессе оксидная пленка впоследствии удаляется, чтобы получить желаемый слой кремния на сапфире [36]. Появление этой технологии позволило также снизить стоимость КНС-устройств.

Для увеличения коммутируемой мощности переключателей, построенных по КНС КМОП-технологии, pSemi в своих устройствах используют этажерочное включение транзисторов (рис. 12). В этом случае ПТ как бы складываются в стопку, что увеличивает результирующее напряжение пробоя. Однако в таком случае затрудняется равномерное распределение мощности по транзисторам [1, 2–5].

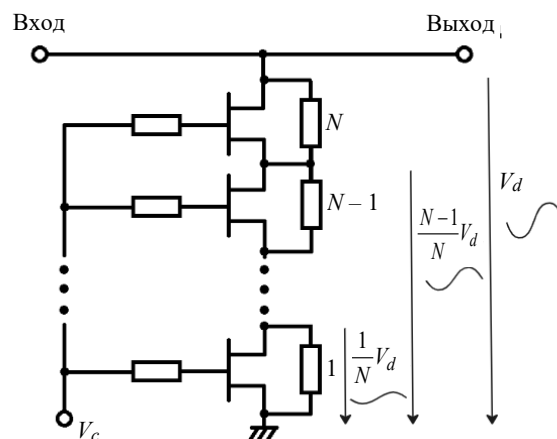


Рис. 12. Этажерочная схема включения транзисторов для SPST-переключателя

Fig. 12. Stacked transistor circuit for SPST switcher

Современные КНИ и КНС КМОП-устройства могут быть изготовлены с использованием отработанной стандартной технологии, при этом минимизируя ее недостатки, оставляя за собой основные плюсы КМОП – высокую интегрируемость с другими устройствами и малые управляющие токи. Использование в подложке слоя изолятора позволило устройствам на КНИ и КНС повысить быстродействие, улучшить высокочастотные и изоляционные свойства, снизить энергопотребление. Хотя КНС лидирует по ряду показателей, устройства КНИ на данный момент являются более дешевыми, сохраняя при этом существенное преимущество перед стандартной КМОП-технологией. Кроме того, КНИ и КНС КМОП-технологии имеют высокую радиационную стойкость, что особенно важно для применения в космической и военной технике. На данный момент КНИ и КНС являются конкурентными с арсенид-галлиевыми технологиями в космической технике [1, 2–5, 7–10, 36, 39].

Эквивалентные схемы МОП ПТ. Так же, как и для НЕМТ-транзисторов, для МОП ПТ существует большое количество моделей и эквивалентных схем [24, 37]. Малосигнальные схемы одиночных МОП-транзисторов практически не отличаются от рассмотренной на рис. 8, а. Модели транзисторов могут быть более и менее подробными и достоверными, учитывать те или иные эффекты. Многие САПР при моделировании позволяют выбрать используемую модель, каждая из которых имеет свой

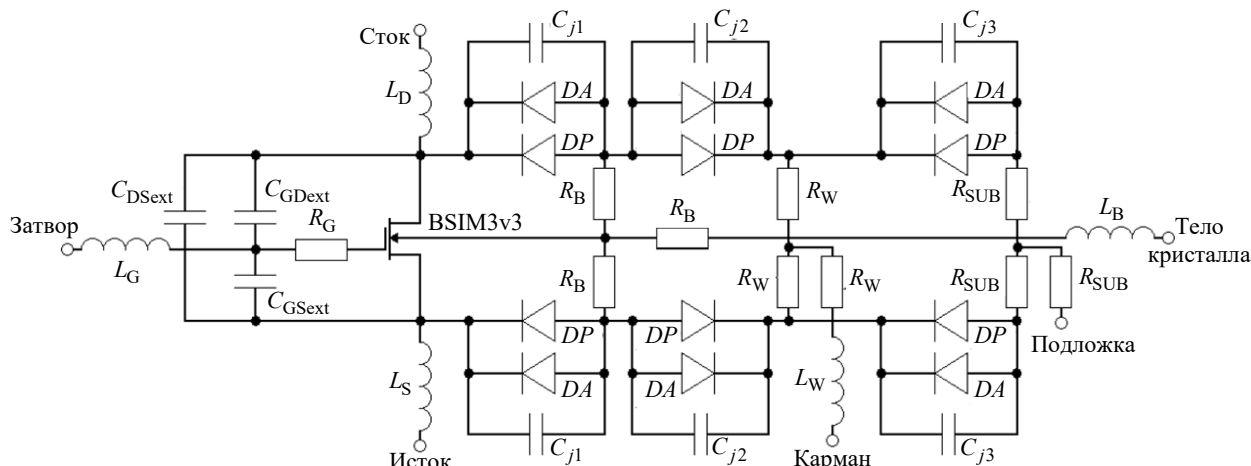


Рис. 13. Эквивалентная схема МОП-транзистора в режиме большого сигнала [40]

Fig. 13. Equivalent circuit of the MOS transistor in large signal mode [40]

набор параметров, который может быть получен экспериментально, аналитически или указан в техническом паспорте к устройству.

Как было отмечено, важной особенностью КНИ/КНС КМОП-структур является радиационная стойкость, однако обычно модели САПР не учитывают радиационных эффектов. Поэтому для проектирования устройств специального назначения разрабатываются дополнительные модели, учитывающие различные эффекты воздействия радиации: суммарной поглощённой дозы, импульсного облучения, одиночных ядерных частиц [37].

Современные СВЧ-модели МОП ПТ в большинстве своем предназначены для расчета характеристик транзистора в пологой области выходных характеристик. Такие модели обычно предполагают использование транзисторов для усиления, преобразования или детектирования сигналов. При проектировании переключателей основной интерес представляет крутая область работы транзисторов – область, в которой ток стока линейно зависит от напряжения между стоком и истоком при фиксированном управляющем напряжении. Поэтому при применении для разработки переключателей существующих стандартных моделей СВЧ МОП-транзисторов часто не удается обеспечить кор-

ректное моделирование параметров разрабатываемого переключателя. На основе стандартных моделей для проектирования переключателей специально разрабатываются модели МОП-транзисторов (рис. 13) [40].

Модель состоит из внутреннего ядра BSIM3v3 и "внешнего" транзистора. Здесь L_G , L_D , L_S , L_B , L_W – индуктивности металлизации затвора, стока, истока и подложки соответственно. Сопротивления затвора, карманов и подложки учитываются элементами R_G , R_B , R_W , R_{SUB} . Емкостные связи между металлизациями контактов затвора, стока и истока, соответственно, обозначены элементами C_{DSext} , C_{GSext} , C_{GDext} , $C_{j1,2,3}$ – емкости p - n -переходов между стоком, истоком и подложкой (карманом), DA и DP – плоскостные и краевые диоды между стоком, истоком и подложкой (карманом) соответственно. Данная схема позволяет получить корректный расчет параметров переключателей на частоте до 5 ГГц [40].

Достижимые параметры переключателей на основе КМОП ПТ. Переключатели на основе КМОП ПТ позволяют получить конкурентные значения достижимых параметров переключателей (табл. 3). На рынке представлены

Табл. 3. Достижимые параметры переключателей на КМОП ПТ [1, 7–10, 33, 40, 42–45]

Tab. 3. Achievable parameters of switches on CMOS FETs [1, 7–10, 33, 40, 42–45]

Параметр	Bulk [43]	Bulk [44]	Bulk [45]	SOI [40]	SOI [42]	SOS [34]	SOS [7–10]	SOS [1]
FOM, фс	147	–	134	64	75.6	448	–	264
IL, дБ	3.3...4	3.5	0.3...0.36	0.7...1.4	3...4.5	–	0.9...2.7	–
Iso, дБ	21.1...23.7	18	35...58	–	20...30	–	80...36	–
Диапазон частот, ГГц	130...180	70...100	0...10	0...60	140...220	0...25	9·10 ⁻⁶ ... 60	–

устройства как по стандартной КМОП-технологии, так и на основе КНИ и КНС-структур. Большая часть компаний, таких как Analog Devices, Qorvo, IDT, Mini-Circuits, Skyworks Solutions, работают над совершенствованием КНИ-технологий, но есть производители, работающие и с КНС-технологией. Особенно стоит отметить компанию Peregrine pSemi (ныне – Murata), приложившую большие усилия для совершенствования КНС-технологии и выпускающую переключатели КМОП только такого типа [2–5, 7–10].

КНС теоретически позволяет достичь наименьшего уровня интермодуляционных искажений, наиболее широкого диапазона рабочих частот и быстродействия. Тем не менее в современной литературе достижения КНС-технологий для переключательных устройств представлены довольно скупо. Ожидалось, что переключатели на основе КНС КМОП ПТ смогут достичь уровня FOM менее 200 фс в ближайшее время [1]. Однако, несмотря на то что КНС МОП ПТ имеют меньшие значения паразитных емкостей (C_{off}), чем ПТ, построенные по технологии КНИ, сопротивление во включенном состоянии у КНИ-транзисторов существенно ниже, что позволяет достичь уровня FOM, меньшего в несколько раз по сравнению с КНС-технологиями. Минимальное значение FOM для КНС-переключателей, которое удалось найти в литературе, составляет 264 фс [1], для КНИ-технологий – 64 фс [41].

Активное развитие технологий КМОП КНИ позволило построить устройства с очень широким диапазоном частот, конкурирующим с другими технологиями: 0...60 ГГц [41] и 140...220 ГГц [42]. Постоянно совершенствуются как схемотехнические, так и структурные решения, делая на настоящий момент переключатели на основе КНИ самыми оптимальными из КМОП-устройств по совокупности достижимых параметров, степени интегрируемости и стоимости изготовления.

Совершенствуется также и стандартная КМОП-технология. Дополнение различных вариантов внутреннего импеданса позволяет улучшить характеристики устройств [43, 44]. Подобные решения позволили улучшить FOM для переключателя по стандартной КМОП-

технологии до 147 фс при частоте от 110 до 180 ГГц [43]. Совершенствование структуры транзисторов также имеет потенциал. Теоретически полученные результаты позволили достичь FOM = 134 фс на частотах до 10 ГГц при очень низких потерях и довольно высокой развязке [45].

SiGe биполярные транзисторы с гетеропереходом. Рынок транзисторных переключателей базируется в основном на GaAs и GaN HEMT и Si КМОП ПТ [1–10, 13]. Однако в литературе встречаются и другие технологии, теоретически позволяющие достичь конкурентных параметров переключателей. Со временем они, возможно, будут использоваться для создания промышленных изделий. Наиболее хорошо представлены в литературе исследования на основе SiGe биполярных транзисторов с гетеропереходом (БГТ) или в англоязычной литературе heterojunction bipolar transistor (HBT) [46–51].

Идея повышения инжекции в эмиттере биполярного транзистора за счет изменения ширины запрещенной зоны материала была сформулирована еще в 1948 г. Однако на тот момент создание гетероструктур с малым количеством дефектов на границе раздела материалов было очень затруднено. Позднее развитие технологий гетеропереходов и постоянно ведущиеся разработки по улучшению параметров биполярных транзисторов, таких как коэффициент усиления по току и граничных частот, заставило разработчиков вновь обратить внимание на БГТ. Эмиттерный переход в БТ с гетеропереходом является гетеропереходом, состоящим из широкозонного эмиттера и узкозонной базы. Коллекторный переход также может быть гетеропереходом с широкозонным коллектором. В настоящее время БГТ изготавливаются на основе различных материалов широко известных гетеропереходных пар: SiGe, AlGaAs/GaAs, InGaP/GaAs. Также были попытки создать такие транзисторы на основе нитридов: GaN/SiC, AlGaN/GaN [47].

В переключателях обычно используются SiGe БГТ, позволяющие контролируемо менять ширину запрещенной зоны обычного Si, т. е. менять параметры материала в области базы биполярного транзистора, увеличивая граничные частоты его работы и степень инжекции носителей из эмиттера в базу при открывании

перехода. Надежность SiGe-приборов конкурентна с надежностью обычных кремниевых приборов, но при этом SiGe-технология позволяет обеспечить более высокие рабочие частоты. SiGe-приборы превосходят аналогичные GaAs-устройства по однородности характеристик на пластине, дешевизне изготовления и более высокому выходу годных, незначительно уступая при этом по быстродействию [48].

Создание переключателей на SiGe БГТ обычно осуществляется на основе переключателей на КМОП-транзисторах с помощью замены ПТ биполярными, например, как показано на рис. 14. Интерес к переходу от КМОП-переключателей к переключателям на БГТ особенно явно наблюдается в литературе, посвященной созданию переключательных устройств в миллиметровом диапазоне длин волн [46, 49]. Твердотельные ВЧ-переключатели с наиболее совершенными характеристиками реализуются на НЕМТ-транзисторах или *pin*-диодах, однако такие решения являются дорогостоящими. КМОП-решения дешевле, однако уступают по характеристикам более дорогим аналогам. В литературе показано, что теоретически использование SiGe БГТ, обладающего большим (до 500 ГГц) значением граничной частоты, позволит получить характеристики переключателей миллиметрового диапазона, близкие к НЕМТ-транзисторным и *pin*-диодным решениям, при этом их стоимость при серийном производстве будет существенно дешевле. Схема SPDT-переключателя, представленная на рис. 14, *а*, является довольно популярным решением для переключателей сигналов с частотой выше

60 ГГц [46, 49] (L_{stub} – шунтирующая линия передачи). Обратим внимание, что биполярные транзисторы можно подключить по-разному (рис. 14, *б*, *в*), но в обоих случаях работают в области насыщения. Конфигурации как прямого (рис. 14, *б*), так и обратного (рис. 14, *в*) насыщения позволяют добиться существенно меньшего значения сопротивления R_{on} , по сравнению с переключателем на КМОП. Конфигурация с обратным насыщением позволяет дополнительно улучшить характеристики переключателя. В режиме обратного насыщения транзистор перевернут, при этом эмиттер находится на выходе, а коллектор заземлен. Это улучшает характеристики коммутатора по двум причинам. Во-первых, эмиттер физически хорошо изолирован от проводящей кремниевой подложки, что приводит к уменьшению паразитных емкостей. Во-вторых, из-за более высокого уровня легирования в эмиттере и индивидуального уменьшения ширины заперщенной зоны, индуцированного Ge в базе, электроны для переноса из эмиттера в базу должны преодолеть больший потенциальный барьер (рис. 15). Поскольку потенциальный барьер ΔE_C в зоне проводимости больше у эмиттера, чем у коллектора ($\Delta E_{CE} > \Delta E_{CC}$), сопротивление закрытого эмиттерного перехода больше [46].

Перспективным для современных радиотехнических устройств является использование БиКМОП-технологии совместно с БГТ. Эта технология позволяет объединить преимущества БГТ и традиционного КМОП-процесса для проектирования интегральных схем на кри-

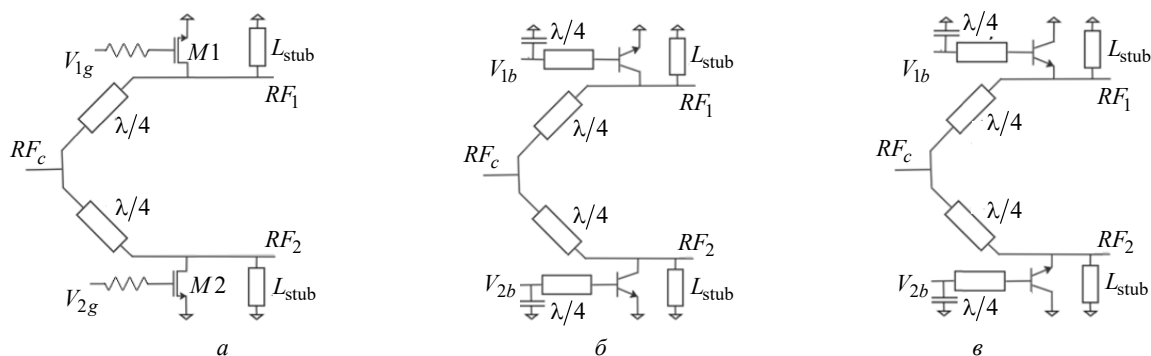


Рис. 14. SPDT-переключатель: *а* – на КМОП-транзисторах; *б* – на SiGe БГТ в конфигурации прямого насыщения; *в* – на SiGe БГТ в конфигурации обратного насыщения

Fig. 14. SPDT switch: on CMOS transistors (*a*); on SiGe HBT in the configuration of direct (*b*) and reverse (*c*) saturation

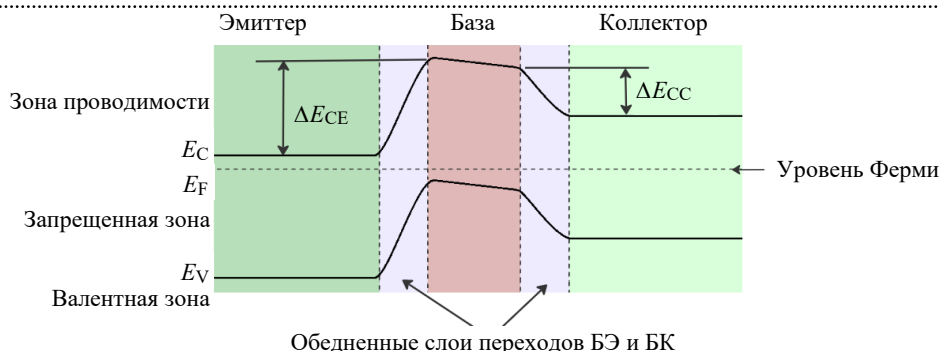


Рис. 15. Диаграмма энергетических зон SiGe БГТ в термодинамическом равновесии

Fig. 15. Diagram of energy bands SiGe HBT in thermodynamic equilibrium



Рис. 16. 0.13-мкм технология интеграции биполярного транзистора в КМОП-процесс (БиКМОП) [50]

Fig. 16. 0.13 μm technology for integrating bipolar transistor into a CMOS process (BiCMOS) [50]

Табл. 4. Достижимые параметры переключателей на БГТ

Tab. 4. Achievable parameters of switches on HBT

Параметр	SiGe БГТ с прямым насыщением [46]	SiGe БГТ с обратным насыщением [46]	БиКМОП SiGe БГТ
FOM, фс	132	132	83.7
IL, дБ	1.8	1.4	2.6...3
Iso, дБ	19.3	19.3	23.5...29
Диапазон частот, ГГц	82...110	77...100	96...163

сталле, объединяя цифровые и аналоговые блоки с пассивными компонентами [48].

Пример реализации БиКМОП SiGe БГТ, т. е. создания биполярного транзистора в процессе изготовления кристалла по стандартной КМОП-технологии, предполагает проведение дополнительных мероприятий между стандартными этапами КМОП-технологии (рис. 16).

Построенные на БГТ по БиКМОП-технологии SPDT-переключатели продемонстрировали конкурентные с другими технологиями характеристики (табл. 4).

Заключение. В статье рассмотрены используемые в переключателях основные типы транзисторов, их материалы, технологии изготовления и достижимые параметры построен-

ных на них переключателей. Выбор того или иного типа прибора для построения переключателя зависит от ряда факторов. Среди транзисторных решений минимальное значение FOM демонстрируют GaAs НЕМТ. При переключении сигналов большой мощности наилучшими являются GaN НЕМТ-решения. Однако технологии КМОП более предпочтительны там, где требуются более дешевые и массово воспроизводимые устройства. КМОП КНИ-технологии демонстрируют хоть и немного худшие по сравнению с GaAs НЕМТ значе-

ния FOM, но вполне приемлемые для большинства приложений. Кроме того, КМОП КНИ и КНС обладают высокой радиационной стойкостью в сравнении со стандартной КМОП-технологией. На данный момент КМОП КНИ и КНС конкурируют с GaAs НЕМТ в космических и военных приложениях. Перспективным оказалось создание SiGe БГТ по БиКМОП-технологии. Развитие этой технологии в дальнейшем может сделать ее конкурентной с другими существующими решениями.

Авторский вклад

Торина Елена Михайловна – подготовка текста статьи и рисунков.

Кочемасов Виктор Неофидович – подготовка текста статьи.

Сафин Ансар Ризаевич – подготовка текста статьи.

Author's contribution

Elena M. Torina, preparation of the text and figures for the paper.

Victor N. Kochemasov, preparation of the text for the paper.

Ansar R. Safin, preparation of the text for the paper.

Список литературы

1. Hindle P. The state of RF and microwave switches // Microwave J. 2010. Vol. 53, № 11. P. 20–36.
2. Кочемасов В., Дингес С., Шадский В. Твердотельные СВЧ-переключатели средней и большой мощности. Ч. 1 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2019. № 8. С. 108–113. doi: 10.22184/1992-4178.2019.189.8.108.112
3. Кочемасов В., Дингес С., Шадский В. Твердотельные СВЧ-переключатели средней и большой мощности. Ч. 2 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2019. № 9. С. 116–131. doi: 10.22184/1992-4178.2019.190.9.116.130
4. Кочемасов В., Дингес С., Шадский В. Твердотельные СВЧ-переключатели средней и большой мощности. Ч. 3 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2019. № 10. С. 82–95. doi: 10.22184/1992-4178.2019.191.10.82.94
5. Кочемасов В., Дингес С., Шадский В. Твердотельные СВЧ-переключатели средней и большой мощности. Ч. 4 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2020. № 1. С. 142–151. doi: 10.22184/1992-4178.2020.192.1.142.151
6. Торина Е. М., Кочемасов В. Н., Сафин А. Р. Переключательные *pin*-диоды // СВЧ-электроника. 2021. № 4. С. 32–40.
7. Кочемасов В., Сафин А., Дингес С. Твердотельные СВЧ-переключатели с высокой скоростью коммутации. Ч. 1 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2020. № 10. С. 70–82. doi: 10.22184/1992-4178.2020.201.10.70.82
8. Кочемасов В., Сафин А., Дингес С. Твердотельные СВЧ-переключатели с высокой скоростью коммутации. Ч. 2 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2021. № 1. С. 98–109. doi: 10.22184/1992-4178.2021.202.1.98.108
9. Кочемасов В., Сафин А., Дингес С. Твердотельные СВЧ-переключатели с высокой скоростью коммутации. Ч. 3 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2021. № 3. С. 108–122. doi: 10.22184/1992-4178.2021.204.3.108.122
10. Кочемасов В., Сафин А., Дингес С. Твердотельные СВЧ-переключатели с высокой скоростью коммутации. Ч. 4 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2021. № 4. С. 104–115. doi: 10.22184/1992-4178.2021.205.4.104.115
11. Кочемасов В., Майстренко А. СВЧ-переключатели на основе МЭМС // СВЧ-электроника. 2016. № 1. С. 36–42.
12. A 25 THz FCO (6.3 fs RON* COFF) Phase-Change Material RF Switch Fabricated in a High Volume Manufacturing Environment with Demonstrated Cycling > 1 Billion Times / N. El-Hinnawy, G. Slovin, J. Rose, D. Howard // IEEE/MTT-S Intern. Microwave Symp. (IMS). Los Angeles, USA, 4–6 Aug. 2020. Piscataway: IEEE, 2020. P. 45–48. doi: 10.1109/IMS30576.2020.9223973
13. Berezniak A. F., Korotkov A. S. Solid-state microwave switches: Circuitry, manufacturing technologies and development trends. Review (pt. 1) // Radioelectron-

ics and Communications Systems. 2013. Vol. 56, № 4. P. 159–177. doi: 10.3103/S0735272713040018

14. Кочемасов В., Сафин А., Дингес С. Антенные переключатели. Ч. 1 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2022. № 7. С. 102–115.

15. Кочемасов В., Сафин А., Дингес С. Антенные переключатели. Ч. 2 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2022. № 8. С. 86–99. doi: 10.22184/1992-4178.2022.219.8.86.99

16. Кочемасов В., Сафин А., Дингес С. Антенные переключатели. Ч. 3 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2022. № 9. С. 90–97. doi: 10.22184/1992-4178.2022.220.9.90.96

17. Кочемасов В., Сафин А., Дингес С. Антенные переключатели. Ч. 4 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2022. № 10. С. 76–91. doi: 10.22184/1992-4178.2022.221.10.76.91

18. Zuleeg R., Notthoff J. K., Lehovec K. Femtojoule high speed planar GaAs E-JFET logic // IEEE Transactions on Electron Devices. 1978. Vol. 25, № 6. P. 628–639.

19. Zolper J. C., Hietala V. M., Housel M. S. Comparison of GaAs JFETs to MESFETs for high-temperature operation // Sandia National Lab. (SNL-NM). 1996. № SAND-96-1418C. P. CONF-9606159-6.

20. Александров Р. Монолитные интегральные схемы СВЧ: взгляд изнутри // Компоненты и технологии. 2005. № 53. С. 174–182.

21. Mimura T. The early history of the high electron mobility transistor (HEMT) // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. № 50. P. 780–782.

22. A New Field-Effect Transistor with Selectively Doped GaAs/ n -Al_xGa_{1-x}As Heterojunctions / T. Mimura, S. Hiyamizu, T. Fujii, K. Nanbu // Japanese J. of Applied Physics. 1980. Vol. 19, № 5. P. 225–227. doi: 10.1143/JJAP.19.L225

23. High switching performance 0.1- μ m metamorphic HEMTs for low conversion loss 94-GHz resistive mixers / D. An, B. H. Lee, B. O. Lim, M. K. Lee // IEEE Electron Device Lett. 2005. Vol. 26, № 10. P. 707–709. doi: 10.1109/LED.2005.856013

24. Денисенко В. Моделирование МОП-транзисторов. Методологический аспект // Компоненты и технологии. 2004. № 43. С. 56–61.

25. Коколов А. А., Бабак Л. И. Методика построения малосигнальной модели СВЧ-транзистора с высокой подвижностью электронов // Докл. Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2010. Т. 22, № 2–1. С. 153–156.

26. Angelov I., Bengtsson L., Garcia M. Extensions of the Chalmers nonlinear HEMT and MESFET model // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1996. Vol. 44, № 10. P. 1664–1674.

27. Лазарев А. В., Рахимов С. К. Применение GaAs HEMT-технологии для разработки ММИС МШУ // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 33. С. 1376–1381.

28. Kameche M., Drozdovski N. V. GaAs-, InP- and GaN HEMT-based microwave control devices: what is best and why // Microwave J. 2005. Vol. 48, № 5. P. 164–173.

29. Moore A., Jimenez J. GaN RF Technology for dummies // TriQuint Special Edition. 2015. Vol. 111. P. 5774.

30. W-band SPDT switches in planar and tri-gate 100-nm gate-length GaN-HEMT technology / F. Thome, E. Ture, P. Brückner, Q. Rüdiger // 11th German Microwave Conf. Piscataway: IEEE, 2018. P. 331–334. doi: 10.23919/GEMIC.2018.8335097

31. Jie M., Fei Y., HuaiYu T. Millimeter-Wave SPDT Switch MMICs With Travelling Wave Concept // IEEE 5th Intern. Conf. on Integrated Circuits and Microsystems. Piscataway: IEEE, 2020. P. 263–266. doi: 10.1109/ICICM50929.2020.9292161

32. Thome F., Ambacher O. Highly isolating and broadband single-pole double-throw switches for millimeter-wave applications up to 330 GHz // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2017. Vol. 66, № 4. P. 1998–2009. doi: 10.1109/TMTT.2017.2777980

33. Meng F., Ma K., Yeo K. S. 2.3 A 130-to-180GHz 0.0035 mm² SPDT switch with 3.3 dB loss and 23.7 dB isolation in 65nm bulk CMOS // IEEE Intern. Solid-State Circuits Conf. Digest of Technical Papers. Piscataway: IEEE, 2015. P. 1–3. doi: 10.1109/isscc.2015.7062852

34. The state-of-the-art of silicon-on-sapphire CMOS RF switches / D. Kelly, C. Brindle, C. Kemerling, M. Stuber // IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symp. 2005. Piscataway: IEEE, 2005. P. 200–203. doi: 10.1109/CSICS.2005.1531812

35. Comparison of bulk and SOI CMOS Technologies in a DSP Processor Circuit Implementation / P. Simonen, A. Heinonen, M. Kuulusa, J. Nurmi // ICM 2001 Proc. The 13th Intern. Conf. on Microelectronics. Piscataway: IEEE, 2001. P. 107–110. doi: 10.1109/ICM.2001.997499

36. Nakamura T., Matsushashi H., Nagatomo Y. Silicon on sapphire (SOS) device technology // Oki technical review. 2004. Vol. 71, № 4. P. 66–69.

37. Проектирование МОП-переключателей СВЧ-диапазона с высоким уровнем развязки / В. В. Репин, И. И. Мухин, М. Г. Дроздецкий, А. С. Шнитников // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2015). 2015. С. 125–126.

38. Comparison of substrate effects in sapphire, trap-rich and high resistivity silicon substrates for RF-SOI applications / V. Sekar, C. C. Cheng, R. Whatley, Ch. Zeng, A. Zeng, A. Genc, T. Ranta, F. Rotella // IEEE 15th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems. Piscataway: IEEE, 2015. P. 37–39.

39. Компактная макромодель КНИ/КНС МОП-транзистора, учитывающая радиационные эффекты / К. О. Петросянц, Л. М. Самбурский, И. А. Харитонов, А. П. Ятманов // Изв. высших учебных заведений.

Электроника. 2011. № 1 (87). С. 20–28.

40. Метелкин И. О., Усачев Н. А., Елесин В. В. Модель изолированного МОП-транзистора для проектирования СВЧ-переключателей сигнала // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2015). 2015. С. 111–112.

41. 5G mm-Wave front-end-module design with advanced SOI process / C. Li, M. Wang, T. Chi, A. Kumar // IEEE 12th Intern. Conf. on ASIC. Piscataway: IEEE, 2017. P. 1017–1020. doi: 10.1109/ASICON.2017.8252651

42. Uzunkol M., Rebeiz G. M. 140–220 GHz SPST and SPDT switches in 45 nm CMOS SOI // IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2012. Vol. 22, № 8. P. 412–414.

43. Meng F., Ma K., Yeo K. S. 2.3 A 130-to-180GHz 0.0035 mm² SPDT switch with 3.3 dB loss and 23.7 dB isolation in 65nm bulk CMOS // IEEE Intern. Solid-State Circuits Conf. Digest of Technical Papers. Piscataway: IEEE, 2015. P. 1–3. doi: 10.1109/isscc.2015.7062852

44. A W-Band SPDT Switch With 15-dBm P1dB in 55-nm Bulk CMOS / L. Chen, Z. G., Y. Sun, T. Hamilton, X. Zhu // IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2022. Vol. 32, № 7. P. 879–882.

45. Ning R., Liu T., Shen J. Modeling and analysis of stacked depletion-mode NMOS transistors for RF switch applications // IEEE Intern. Conf. on Electro Information Technology. Piscataway: IEEE, 2017. P. 34–38. doi: 10.1109/EDTM.2017.8000254

46. A 94 GHz, 1.4 dB Insertion Loss Single-Pole Double-Throw Switch Using Reverse-Saturated SiGe HBTs / R. L. Schmid, A. C. Ulusoy, P. Song, J. D. Cressler // IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2014. Vol. 24, № 1. P. 56–58. doi: 10.1109/LMWC.2013.2288276

47. Ковалев А. Н. Биполярные гетеротранзисторы на основе SiGe и aIIIbv // Изв. высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2008. № 2. С. 4–21.

48. Мухин И. И., Репин В. В. Применение SiGe БиКМОП-технологии для построения МИС дискретного фазовращателя, использующего принцип векторного сложения // Микроэлектроника СВЧ: сб. тр. Всерос. конф. Т. 2. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2012. С. 120–122.

49. Dong H., Chen J., Hou D. A Compact Bidirectional K and Ka Band SPDT in 0.13μm SiGe BiCMOS Process // IEEE Intern. Symp. on Radio-Frequency Integration Technology. Piscataway: IEEE, 2018. P. 1–3.

50. Avenier G., Chevalier P., Troillard G. et al. 0.13 μm SiGe BiCMOS technology for mm-wave applications // IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. Piscataway: IEEE, 2008. P. 89–92. doi: 10.1109/BIPOL.2008.4662719

51. Ulusoy A. C., Song P., Schmid R. L. et al. A low-loss and high isolation D-band SPDT switch utilizing deep-saturated SiGe HBTs // IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2014. Vol. 24, № 6. P. 400–402. doi: 10.1109/LMWC.2014.2313529

Информация об авторах

Торина Елена Михайловна – кандидат технических наук (2016), доцент кафедры формирования и обработки радиосигналов Национального исследовательского университета (НИУ) "МЭИ", старший научный сотрудник ООО "Радиокомп". Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – радиофизика и электроника; устройства генерирования и формирования радиосигналов.

Адрес: НИУ "МЭИ", Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250, Россия

E-mail: dro.em@yandex.ru

Кочемасов Виктор Неофидович – кандидат технических наук (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 (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: НИУ "МЭИ", Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250, Россия

E-mail: arsaфин@gmail.com

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

References

1. Hindle P. The State of RF and Microwave Switches. Microwave J. 2010, vol. 53, no. 11, pp. 20–36.

2. Kochemasov V., Dinges S., Shadsky V. Solid-State Microwave Switches of Medium and High Power.

Pt. 1. Electronics: Science, Technology, Business. 2019, no. 8, pp. 108–113. doi: 10.22184/1992-4178.2019.189.8.108.112 (In Russ.)

3. Kochemasov V., Dinges S., Shadsky V. Solid-State Microwave Switches of Medium and High Power. Pt. 2. Electronics: Science, Technology, Business. 2019, no. 9, pp. 116–131. doi: 10.22184/1992-4178.2019.190.9.116.130 (In Russ.)
4. Kochemasov V., Dinges S., Shadsky V. Solid-State Microwave Switches of Medium and High Power. Pt. 3. Electronics: Science, Technology, Business. 2019, no. 10, pp. 82–95. doi: 10.22184/1992-4178.2019.191.10.82.94 (In Russ.)
5. Kochemasov V., Dinges S., Shadsky V. Solid-State Microwave Switches of Medium and High Power. Pt. 4. Electronics: Science, Technology, Business. 2020, no. 1, pp. 142–151. doi: 10.22184/1992-4178.2020.192.1.142.151 (In Russ.)
6. Torina E. M., Kochemasov V. N., Safin A. R. Switching *pin*-diodes. SHF Electronics. 2021, no. 4, pp. 32–40. (In Russ.)
7. Kochemasov V., Safin A., Dinges S. Solid State Microwave Switches with High Switching Speed. Pt. 1. Electronics: Science, Technology, Business. 2020, no. 10, pp. 70–82. doi: 10.22184/1992-4178.2020.201.10.70.82 (In Russ.)
8. Kochemasov V., Safin A., Dinges S. Solid State Microwave Switches with High Switching Speed. Pt. 2. Electronics: Science, Technology, Business. 2021, no. 1, pp. 98–109. doi: 10.22184/1992-4178.2021.202.1.98.108 (In Russ.)
9. Kochemasov V., Safin A., Dinges S. Solid State Microwave Switches with High Switching Speed. Pt. 3. Electronics: Science, Technology, Business. 2021, no. 3, pp. 108–122. doi: 10.22184/1992-4178.2021.204.3.108.122 (In Russ.)
10. Kochemasov V., Safin A., Dinges S. Solid State Microwave Switches with High Switching Speed. Pt. 4. Electronics: Science, Technology, Business. 2021, no. 4, pp. 104–115. doi: 10.22184/1992-4178.2021.205.4.104.115 (In Russ.)
11. Kochemasov V., Maystrenko A. Microwave Switches Based on MEMS. Microwave Electronics. 2016, no. 1, pp. 36–42. (In Russ.)
12. El-Hinnawy N., Slovin G., Rose J., Howard D. A 25 THz FCO (6.3 fs RON* COFF) Phase-Change Material RF Switch Fabricated in a High Volume Manufacturing Environment with Demonstrated Cycling > 1 Billion Times. IEEE/MTT-S Intern. Microwave Symp. (IMS). Los Angeles, USA, 4–6 Aug. 2020. Piscataway, IEEE, 2020, pp. 45–48. doi: 10.1109/IMS30576.2020.9223973
13. Bereznik A. F., Korotkov A. S. Solid-State Microwave Switches: Circuitry, Manufacturing Technologies and Development Trends. Review (part 1). Radioelectronics and Communications Systems. 2013, vol. 56, no. 4, pp. 159–177. doi: 10.3103/S0735272713040018
14. Kochemasov V., Safin A., Dinges S. Antenna Switches. Pt. 1. Electronics: Science, Technology, Business. 2022, no. 7, pp. 102–115. (In Russ.)
15. Kochemasov V., Safin A., Dinges S. Antenna Switches. Pt. 2. Electronics: Science, Technology, Business. 2022, no. 8, pp. 86–99. doi: 10.22184/1992-4178.2022.219.8.86.99 (In Russ.)
16. Kochemasov V., Safin A., Dinges S. Antenna Switches. Pt. 3. Electronics: Science, Technology, Business. 2022, no. 9, pp. 90–97. doi: 10.22184/1992-4178.2022.220.9.90.96 (In Russ.)
17. Kochemasov V., Safin A., Dinges S. Antenna Switches. Pt. 4. Electronics: Science, Technology, Business. 2022, no. 10, pp. 76–91. doi: 10.22184/1992-4178.2022.221.10.76.91 (In Russ.)
18. Zuleeg R., Notthoff J. K., Lehovc K. Femtojoule High Speed Planar GaAs E-JFET logic. IEEE Transactions on Electron Devices. 1978, vol. 25, no. 6, pp. 628–639.
19. Zolper J. C., Hietala V. M., Housel M. S. Comparison of GaAs JFETs to MESFETs for High-Temperature Operation. Sandia National Lab. (SNL-NM). 1996, no. SAND-96-1418C, p. CONF-9606159-6.
20. Alexandrov R. Microwave Monolithic Integrated Circuits: An Inside View. Components and Technologies. 2005, no. 53, pp. 174–182. (In Russ.)
21. Mimura T. The Early History of the High Electron Mobility Transistor (HEMT). IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002, no. 50, pp. 780–782.
22. Mimura T., Hiyamizu S., Fujii T., Nanbu K. A New Field-Effect Transistor with Selectively Doped GaAs/*n*-Al_xGa_{1-x}As Heterojunctions. Japanese J. of Applied Physics. 1980, vol. 19, no. 5, pp. 225–227. doi: 10.1143/JJAP.19.L225
23. An D., Lee B. H., Lim B. O., Lee M. K. High Switching Performance 0.1-μm Metamorphic HEMTs for low Conversion Loss 94-GHz Resistive Mixers. IEEE Electron Device Lett. 2005, vol. 26, no. 10, pp. 707–709. doi: 10.1109/LED.2005.856013
24. Denisenko V. Modeling MOS Transistors. Methodological Aspect. Components and Technologies. 2004, no. 43, pp. 56–61. (In Russ.)
25. Kokolov A. A., Babak L. I. A Technique for Constructing a Small-Signal Model of a Microwave Transistor with High Electron Mobility. Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. 2010, vol. 22, no. 2–1, pp. 153–156. (In Russ.)
26. Angelov I., Bengtsson L., Garcia M. Extensions of the Chalmers Nonlinear HEMT and MESFET model. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1996, vol. 44, no. 10, pp. 1664–1674.
27. Lazarev A. V., Rakhimov S. K. Application of GaAs HEMT Technology for the Development of MMIS LNA. Innovations. The Science. Education. 2021, no. 33, pp. 1376–1381. (In Russ.)
28. Kameche M., Drozdovski N. V. GaAs-, InP- and GaN HEMT-Based Microwave Control Devices: What is Best and Why. Microwave J. 2005, vol. 48, no. 5, pp. 164–173.
29. Moore A., Jimenez J. GaN RF Technology for Dummies. TriQuint Special Edition. 2015, vol. 111, p. 5774.
30. Thome F., Ture E., Brückner P., Rüdiger Q. W-Band SPDT Switches in Planar and Tri-Gate 100-nm Gate-Length GaN-HEMT Technology. 11th German

Microwave Conf. Piscataway, IEEE, 2018, pp. 331–334. doi: 10.23919/GEMIC.2018.8335097

31. Jie M., Fei Y., HuaiYu T. Millimeter-Wave SPDT Switch MMICs With Travelling Wave Concept. IEEE 5th Intern. Conf. on Integrated Circuits and Microsystems. Piscataway, IEEE, 2020, pp. 263–266. doi: 10.1109/ICICM50929.2020.9292161

32. Thome F., Ambacher O. Highly Isolating and Broadband Single-Pole Double-Throw Switches for Millimeter-Wave Applications up to 330 GHz. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2017, vol. 66, no. 4, pp. 1998–2009. doi: 10.1109/TMTT.2017.2777980

33. Meng F., Ma K., Yeo K. S. 2.3 A 130-to-180GHz 0.0035 mm 2 SPDT Switch with 3.3 dB Loss and 23.7 dB Isolation in 65nm Bulk CMOS. IEEE Intern. Solid-State Circuits Conf. Digest of Technical Papers. Piscataway, IEEE, 2015, pp. 1–3. doi: 10.1109/isscc.2015.7062852

34. Kelly D., Brindle C., Kemerling C., Stuber M. The State-of-the-Art of Silicon-on-Sapphire CMOS RF switches. IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symp. 2005. Piscataway, IEEE, 2005, pp. 200–203. doi: 10.1109/CSICS.2005.1531812

35. Simonen P., Heinonen A., Kuulusa M., Nurmi J. Comparison of bulk and SOI CMOS Technologies in a DSP Processor Circuit Implementation. ICM 2001 Proc. The 13th Intern. Conf. on Microelectronics. Piscataway, IEEE, 2001, pp. 107–110. doi: 10.1109/ICM.2001.997499

36. Nakamura T., Matsushashi H., Nagatomo Y. Silicon on Sapphire (SOS) Device Technology. Oki Technical Review. 2004, vol. 71, no. 4, pp. 66–69.

37. Repin V. V., Mukhin I. I., Drozdetsky M. G., Shnitnikov A. S. Designing Microwave Range Mop Switches with a High Level of Decoupling // Microwave Engineering and Telecommunication Technologies (KryMiKo'2015). 2015, pp. 125–126. (In Russ.)

38. Sekar V., Cheng C.C., Whatley R., Zeng Ch., Zeng A., Genc A., Ranta T., Rotella F. Comparison of Substrate Effects in Sapphire, Trap-Rich and High Resistivity Silicon Substrates for RF-SOI Applications. IEEE 15th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems. Piscataway, IEEE, 2015, pp. 37–39.

39. Petrosyants K. O., Sambursky L. M., Kharitonov I. A., Yatmanov A. P. A Compact Macromodel of SOI/SOS MOS Transistors That Takes into Account Radiation Effects. Electronics. 2011, no. 1 (87), pp. 20–28. (In Russ.)

40. Metelkin I. O., Usachev N. A., Yelesin V. V. Model of an Isolated MOS Transistor for Designing Microwave Signal Switches. SHF-technics and telecommunication technologies (KryMiKo'2015). 2015, pp. 111–112. (In Russ.)

41. Li C., Wang M., Chi T., Kumar A. 5G mm-Wave Front-End-Module Design with Advanced SOI Process. IEEE 12th Intern. Conf. on ASIC. Piscataway, IEEE, 2017, pp. 1017–1020. doi: 10.1109/ASICON.2017.8252651

42. Uzunkol M., Rebeiz G. M. 140–220 GHz SPST and SPDT Switches in 45 nm CMOS SOI. IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2012, vol. 22, no. 8, pp. 412–414.

43. Meng F., Ma K., Yeo K. S. 2.3 A 130-to-180GHz 0.0035 mm 2 SPDT Switch with 3.3 dB loss and 23.7 dB Isolation in 65nm Bulk CMOS. IEEE Intern. Solid-State Circuits Conf. Digest of Technical Papers. Piscataway, IEEE, 2015, pp. 1–3. doi: 10.1109/isscc.2015.7062852

44. Chen L., Ge Z., Sun Y., Zhu X. A W-Band SPDT Switch with 15-dBm P1dB in 55-nm Bulk CMOS. IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2022, vol. 32, no. 7, pp. 879–882.

45. Ning R., Liu T., Shen J. Modeling and Analysis of Stacked Depletion-Mode NMOS Transistors for RF Switch Applications. IEEE Intern. Conf. on Electro Information Technology. Piscataway, IEEE, 2017, pp. 34–38. doi: 10.1109/EDTM.2017.8000254

46. Schmid R. L., Ulusoy A. C., Song P., Cressler J. D. A 94 GHz, 1.4 dB Insertion Loss Single-Pole Double-Throw Switch Using Reverse-Saturated SiGe HBTs. IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2014, vol. 24, no. 1, pp. 56–58. doi: 10.1109/LMWC.2013.2288276

47. Kovalev, A. N. Bipolar Heterotransistors Based on SiGe and a_{IIIbV} . News of Higher Educational Institutions. Materials of Electronic Engineering. 2008, no. 2, pp. 4–21. (In Russ.)

48. Mukhin I. I., Repin V. V. Application of SiGe BiCMOS Technology to Build a MIS Discrete Phase Shifter Using the Principle of Vector Addition. Microelectronics Microwave: Proc. of All-Russian Conf. Vol. 2. St Petersburg, Publishing House of SPbETU, 2012, pp. 120–122. (In Russ.)

49. Dong H., Chen J., Hou D. A Compact Bi-directional K and Ka Band SPDT in 0.13 μm SiGe BiCMOS Process. IEEE Intern. Symp. on Radio-Frequency Integration Technology. Piscataway, IEEE, 2018, pp. 1–3.

50. Avenier G., Chevalier P., Troillard G. et al. 0.13 μm SiGe BiCMOS Technology for mm-Wave Applications. IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. Piscataway, IEEE, 2008, pp. 89–92. doi: 10.1109/BIPOL.2008.4662719

51. Ulusoy A. C., Song P., Schmid R. L. et al. A low-loss and High Isolation D-band SPDT Switch Utilizing Deep-Saturated SiGe HBTs. IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2014, vol. 24, no. 6, pp. 400–402. doi: 10.1109/LMWC.2014.2313529

Information about the authors

Elena M. Torina, Cand. Sci. (Eng.) (2016), Associate Professor of the Department of Radio Signal Generation and Processing of NRU "MPEI", Senior Researcher of Radiocomp LLC. The author of more than 20 scientific pa-

pers. Area of expertise: radiophysics and electronics; radio signals oscillators.

Address: NRU "MPEI", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia

E-mail: dro.em@yandex.ru

Victor N. Kochemasov, Cand. Sci. (Eng.) (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 109316, Russia

E-mail: kochemasovdv@gmail.com

Ansar R. Safin, Cand. Sci. (Eng.) (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 n. a. V. A. Kotelnikov, Head of the Department of Radiocomp LLC. The author of more than 50 scientific papers. Area of expertise: radiophysics and electronics; physics of magnetic phenomena; spintronics.

Address: NRU "MPEI", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia

E-mail: arsaafin@gmail.com

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

Непараметрические байесовские сети как инструмент комплексирования данных мультимасштабного анализа временных рядов и дистанционного зондирования

Н. С. Пыко^{1✉}, Д. В. Тишин^{1,2}, П. Ю. Искандиров^{1,2},
А. М. Гафуров², Б. М. Усманов², М. И. Богачев¹

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

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

✉goststalker13@gmail.com

Аннотация

Введение. Непараметрические байесовские сети представляют собой перспективный инструмент для анализа, визуализации, интерпретации и прогнозирования структурных и динамических характеристик сложных систем. Современные междисциплинарные исследования подразумевают комплексную обработку разнородных данных, получаемых с помощью датчиков различной физической природы. При исследовании лесного фонда широко применяются методы как непосредственных дендрологических измерений, так и дистанционного наблюдения с использованием беспилотных летательных аппаратов. Информацию, полученную с помощью этих методов, необходимо анализировать во взаимосвязи с данными гидрометеорологического мониторинга.

Цель работы. Исследование возможности автоматизации мониторинга благополучия лесного фонда на основе комплексирования данных наземных исследований, дистанционных мультиспектральных измерений и гидрометеорологических наблюдений с использованием математического аппарата непараметрических байесовских сетей.

Материалы и методы. Для оценки долговременной совместной динамики природно-климатических показателей и радиального прироста деревьев использован модифицированный метод мультимасштабного взаимного корреляционного анализа с удалением фонового тренда, описываемого моделью скользящего среднего. Взаимосвязи между различными показателями оценивались на основе безусловных и условных непараметрических коэффициентов корреляции Спирмена, которые использовались для реконструкции и параметризации непараметрической байесовской сети.

Результаты. Построена мультимасштабная непараметрическая байесовская сеть, характеризующая безусловные и условные статистические взаимосвязи между параметрами, полученными в результате дистанционного зондирования, гидроклиматических и дендрологических измерений. Предложенная модель показала хорошее качество прогнозирования состояния растительного фонда. Коэффициенты корреляции между наблюдаемыми и предсказываемыми показателями превышают значения 0.6, а при предсказании тренда прироста годичных колец деревьев коэффициент корреляции составляет 0.77.

Заключение. Предложенная непараметрическая байесовская сетевая модель отражает взаимосвязи между различными факторами, влияющими на лесную экосистему. Байесовская сеть может использоваться для оценки рисков и улучшения планирования экологического управления.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, мультиспектральные вегетационные индексы, корреляционный анализ с удалением тренда, частные корреляции, направленный ациклический граф, непараметрическая байесовская сеть

Для цитирования: Непараметрические байесовские сети как инструмент комплексирования данных мультимасштабного анализа временных рядов и дистанционного зондирования / Н. С. Пыко, Д. В. Тишин, П. Ю. Искандиров, А. М. Гафуров, Б. М. Усманов, М. И. Богачев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 3. С. 32–47. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-32-37

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-76-10042, <https://rscf.ru/project/22-76-10042/>.

Статья поступила в редакцию 19.03.2023; принята к публикации после рецензирования 21.04.2023; опубликована онлайн 29.06.2023

Nonparametric Bayesian Networks as a Tool of Multiscale Time Series Analysis and Remote Sensing Data Integration

Nikita S. Pyko¹✉, Denis V. Tishin^{1,2}, Pavel Yu. Iskandirov^{1,2},
Artur M. Gafurov², Bulat M. Usmanov², Mikhail I. Bogachev¹

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² Kazan Federal University, Kazan, Russia

✉goststalker13@gmail.com

Abstract

Introduction. Nonparametric Bayesian networks are a promising tool for analyzing, visualizing, interpreting and predicting the structural and dynamic characteristics of complex systems. Modern interdisciplinary research involves the complex processing of heterogeneous data obtained using sensors of various physical nature. In the study of the forest fund, both methods of direct dendrological measurements and methods of remote observation using unmanned aerial vehicles are widely used. Information obtained using these methods must be analyzed in conjunction with hydrometeorological monitoring data.

Aim. Investigation of the possibility of automating the monitoring of the well-being of the forest fund based on the integration of ground survey data, remote multispectral measurements and hydrometeorological observations using the mathematical apparatus of nonparametric Bayesian networks.

Materials and methods. To assess the long-term joint dynamics of natural and climatic indicators and the radial growth of trees, a modified method of multiscale cross-correlation analysis was used with the removal of the background trend described by the moving average model. Relationships between various indicators were estimated based on the unconditional and conditional nonparametric Spearman correlation coefficients, which were used to reconstruct and parameterize the nonparametric Bayesian network.

Results. A multiscale nonparametric Bayesian network was constructed to characterize both unconditional and conditional statistical relationships between parameters obtained from remote sensing, hydroclimatic and dendrological measurements. The proposed model showed a good quality of the plant fund state forecasting. The correlation coefficients between the observed and predicted indicators exceed 0.6, with the correlation coefficient comprising 0.77 when predicting the growth trend of annual tree rings.

Conclusion. The proposed nonparametric Bayesian network model reflects the relationship between various factors that affect the forest ecosystem. The Bayesian network can be used to assess risks and improve environmental management planning.

Keywords: remote sensing, multispectral vegetation indices, detrended cross-correlation analysis, partial correlations, directed acyclic graph, nonparametric Bayesian network

For citation: Pyko N. S., Tishin D. V., Iskandirov P. Yu., Gafurov A. M., Usmanov B. M., Bogachev M. I. Nonparametric Bayesian Networks as a Tool of Multiscale Time Series Analysis and Remote Sensing Data Integration. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 3, pp. 32–47. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-32-47

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

Acknowledgements. The study was supported by the Russian Science Foundation grant № 22-76-10042, <https://rscf.ru/project/22-76-10042/>.

Submitted 19.03.2023; accepted 21.04.2023; published online 29.06.2023

Введение. В последние десятилетия возрастает интерес к применению байесовских сетей (БС) для анализа и визуализации сложных взаимосвязей между случайными величинами. БС применяются в климатологии, сейсмологии, гидрологии, медицине, при опреде-

лении безопасности сложных инженерных систем и надежности инфраструктуры, а также во многих других областях знаний [1–5]. Подробный обзор особенностей построения и приложений БС приведен в [6, 7]. БС представляет собой направленный ациклический граф, узлы

Непараметрические байесовские сети как инструмент комплексирования данных

мультимасштабного анализа временных рядов и дистанционного зондирования

Nonparametric Bayesian Networks as a Tool of Multiscale Time Series Analysis and Remote Sensing Data Integration

которого соответствуют анализируемым случайным величинам, а дуги (ребра графа) отражают зависимость между величинами. Между узлами сети на основании проведенных ранее исследований или экспертных оценок устанавливаются отношения "родитель – потомок". Для каждого узла без родителей задается безусловное распределение, а сила зависимости между узлами определяется условными распределениями. Отсутствие дуг между узлами соответствует ситуации условной независимости случайных величин, соответствующих узлам. Отражая причинно-следственные связи между переменными, БС позволяет прогнозировать состояние узлов сети, обеспечивая тем самым поддержку принятия решений.

В случае отсутствия априорной информации о функциональном виде безусловных распределений переменных, соответствующих узлам сети, используют непараметрические байесовские сети (НПБС). Особенности работы с НПБС в значительной степени посвящена [6]. В общем случае сила связи между переменными, расположенными в узлах сети, может быть выражена в терминах различных метрик связности, но основная роль в данном контексте отводится корреляционным метрикам. При построении НПБС, как правило, используют ранговые корреляции Спирмена [6, 7], причем преимущество отдается частным взаимным корреляциям, отражающим "собственные" связи переменных в условиях, когда влияние других переменных исключается [8].

В [9, 10] исследуется роль частной корреляции и условной корреляции как меры условной независимости двух случайных величин, а также устанавливаются необходимые и достаточные условия совпадения частной корреляции с условной корреляцией. Авторы [9, 10] показывают, что совпадение условной и частной корреляций правомерно не только для нормально распределенных случайных величин, но и в широком классе других законов распределения, в частности эллиптических, полиномиальных, гипергеометрических, отрицательных гипергеометрических распределений и распределения Дирихле. Условная независимость переменных является ключевым понятием при построении БС. Узлы графа считаются

связанными тогда и только тогда, когда соответствующие им переменные не являются условно независимыми. Чтобы подтвердить условную независимость, особенно когда переменные непрерывны, как правило, проверяют степень близости к нулю частных коэффициентов корреляции. Только в случае гауссовского распределения из некоррелированности переменных следует их независимость. При построении НПБС понятия условной независимости и нулевой частной корреляции не являются эквивалентными. Однако на практике целесообразнее заменить условную независимость нулевой или достаточно малой частной корреляцией. Тогда несвязанные вершины в графической модели можно, по крайней мере, считать ортогональными друг другу после того, как влияние других переменных будет удалено при переходе к частным корреляциям [7].

Недостатком использования частных корреляций при построении НПБС является тот факт, что значения частных коэффициентов корреляции зачастую очень малы. В результате создается впечатление незначительности выявленных закономерностей. Поэтому при построении БС для визуализации связей между узлами сети в отдельных случаях возможно использование и полных коэффициентов корреляции.

Взаимный корреляционный анализ с удалением тренда. Исследование взаимного поведения временных рядов традиционно проводится с помощью методов корреляционного анализа, который в классическом понимании требует стационарности изучаемых данных. В случае нестационарных данных, включая ситуацию, связанную с общим внешним воздействием на анализируемые переменные, предпочтительным является взаимный корреляционный анализ с удалением тренда. Применяемые на практике процедуры удаления тренда носят мультимасштабный характер, поскольку в обрабатываемых данных могут присутствовать тренды, имеющие различный спектральный состав [11–14].

Методы оценивания взаимной корреляции с удалением тренда предполагают центрирование m исходных временных рядов $x^1, x^2, \dots, x^m$, содержащих каждый по N

отсчетов, и формирование на их основе рядов кумулятивных сумм, называемых профилями:

$$X^j = \sum_{k=1}^i x_k^j; j=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, N.$$

Следующей операцией является удаление тренда. Одной из возможных процедур удаления тренда является описанный в [15] метод центрального скользящего среднего (Central Moving Average – CMA). В соответствии с данным методом тренд оценивается по всей записи профиля в окне скользящего среднего с нечетной длиной s .

Ряд остатков после удаления тренда при использовании метода CMA имеет вид

$$Y_s(i) = X_s^j(i) - CM_s^j(i); i=1, 2, \dots, N,$$

$$\text{где } CM_s^j(i) = \frac{1}{s} \sum_{k=-(s-1)/2}^{(s-1)/2} X^j(i+k).$$

На рис. 1 показана процедура выделения тренда для двух различных окон скользящего среднего размером s на примере синтезированного ряда случайных данных. Сплошной линией на рис. 1 показан график профиля, штриховая (красная) и штрихпунктирная (зеленая) линии отмечают тренд, полученный при использовании двух различных окон $s=90$ и $s=50$ соответственно.

Для оставшихся после удаления тренда флуктуационных составляющих профилей определяются дисперсии

$$F_s^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_s^2(i)$$

и попарные ковариации. Нормировка ковариационной матрицы позволяет получить матрицу коэффициентов взаимной корреляции:

$$R(s) = \begin{bmatrix} R_{1,1}(s) & R_{1,2}(s) & \dots & R_{1,m}(s) \\ R_{2,1}(s) & R_{2,2}(s) & \dots & R_{2,m}(s) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{m,1}(s) & R_{m,2}(s) & \dots & R_{m,m}(s) \end{bmatrix},$$

где $R_{j,j}=1; j=1, 2, \dots, m$.

Переход к матрице частных коэффициентов корреляции осуществляется путем вычисления обратной матрицы коэффициентов взаимной корреляции [11]

$$C(s) = R^{-1}(s) = \begin{bmatrix} C_{1,1}(s) & C_{1,2}(s) & \dots & C_{1,m}(s) \\ C_{2,1}(s) & C_{2,2}(s) & \dots & C_{2,m}(s) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{m,1}(s) & C_{m,2}(s) & \dots & C_{m,m}(s) \end{bmatrix}$$

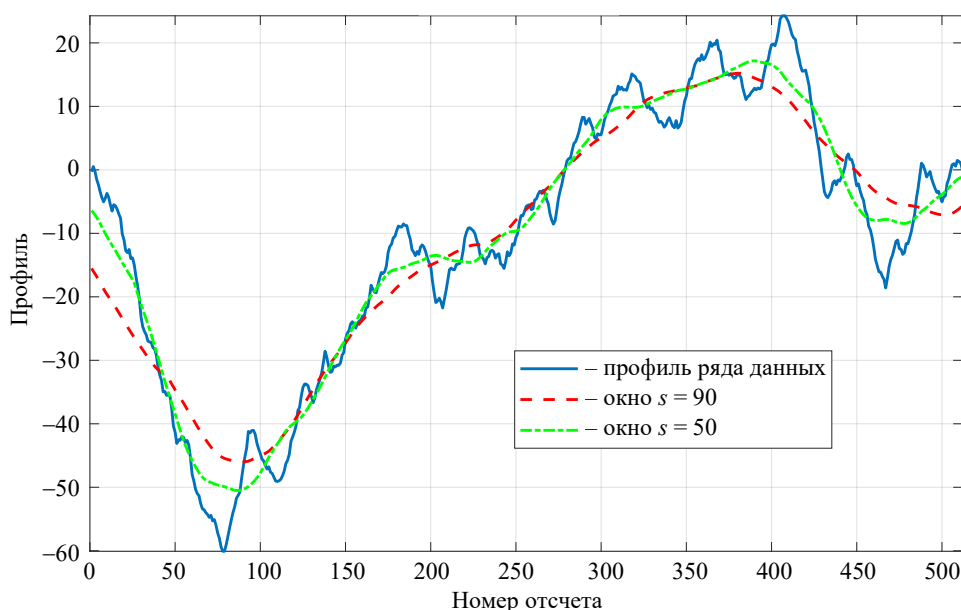


Рис. 1. Выделение тренда методом центрального скользящего среднего

Fig. 1. Trend identification by the method of the central moving average

с последующей нормировкой:

$$P_{j_1, j_2}(s) = \frac{-C_{j_1, j_2}(s)}{\sqrt{C_{j_1, j_1}(s) \cdot C_{j_2, j_2}(s)}}.$$

Мультимасштабность взаимного корреляционного анализа с удалением тренда достигается повторением указанных действий для различных размеров окна скользящего среднего s .

Мультиспектральное зондирование и определение дендрологических показателей.

В рамках данной статьи описанный ранее математический аппарат был применен к задаче экологического мониторинга, направленного на исследование выживаемости и роста сосны обыкновенной на участке сфагнового болота "Долгое" в Волжско-Камском государственном природном биосферном заповеднике. Изучаемый район имеет локальный градиент высот с запада на восток, приводящий к соответствующему градиенту местных гидрологических условий от относительно сухих до более влажных. В соответствии с этим в изучаемом районе были выделены три области – западная, центральная и восточная, обозначенные в связи с различными условиями увлажнения как Dry, Mid и Wet (сухая, средняя и влажная).

В зоне исследования было отобрано 101 дерево, для которых согласно методике, описанной в [16], была определена ширина годовых колец Tree Ring Width (TRW). Точное местоположение каждого изучаемого дерева определяли с помощью GPS-приемника Garmin GPSMAR 62S. Местоположение каждого дерева характеризовалось широтой (latitude – Lat) и долготой (longitude – Lon). Для выделенных деревьев определялись год рождения (Birth Year), среднее значение прироста (Mean growth), среднеквадратическое значение прироста (Std growth), а также тренд прироста годовых колец за последние 35 лет наблюдений (Growth trend), определяемый для каждого дерева с помощью линейного регрессионного анализа как разность ординат последней и первой точек линии регрессии, деленная на среднеквадратическое отклонение прироста годовых колец:

$$\Delta x = (x_{\max} - x_{\min}) / \sigma.$$

Мультиспектральное дистанционное зондирование выполнялось с помощью аэрофотосъемочного комплекса Геоскан 401 Геодезия, оснащенного мультиспектральной камерой MicaSense RedEdge-MX. Частотные диапазоны каналов камеры следующие: синий (Blue, 475 ± 32 нм), зелёный (Green, 560 ± 27 нм), красный (Red, 668 ± 16 нм), красный край (Red Edge, 717 ± 12 нм), ближний инфракрасный (NIR, 842 ± 57 нм).

В основе дистанционного зондирования природных объектов лежит возможность измерения электромагнитной энергии на различных длинах волн в процессе взаимодействия с изучаемыми объектами. В зависимости от физических свойств объекта при взаимодействии с ним электромагнитные волны разных частот в той или иной степени отражаются или поглощаются. Растительность взаимодействует с солнечным излучением иначе, чем другие природные объекты. Спектр растительности обычно отличается поглощением в красном и синем диапазонах, отражением в зеленом диапазоне и сильным отражением в ближнем инфракрасном диапазоне. Различные типы растительности, содержание воды, пигмента, углерода, азота и другие свойства объектов и окружающей их территории обуславливают различия, отражающиеся на спектральном составе электромагнитных колебаний. Измерение спектральных составляющих, изучение их взаимосвязи друг с другом, основанное на оценивании вегетационных индексов, могут предоставить важную информацию о здоровье растений, содержании воды, экологическом стрессе и других важных характеристиках.

Чтобы оценить местные гидрологические условия и связанную с ними активность растительности, согласно методике, приведенной в [17], были рассчитаны различные вегетационные индексы, из которых в результате были использованы три индекса, проявивших значимые отличия на анализируемых площадках:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

– нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI);

$$NDRE = \frac{NIR - RedEdge}{NIR + RedEdge}$$

– нормализованный разностный индекс красного края (Normalized Difference Red Edge – NDRE);

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

– нормализованный разностный водный индекс (Normalized Difference Water Index – NDWI).

Нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI является наиболее известным и часто используемым индексом, характеризующим рассеяние зеленой растительной массы в ближнем инфракрасном диапазоне и поглощение хлорофилла в красном диапазоне. Высокая фотосинтетическая активность приводит к более низким значениям коэффициентов отражения в красной зоне спектра и большим значениям в ближней инфракрасной. Нормализованный разностный индекс красного края NDRE – это индекс вегетации для оценки состояния растительности с использованием крайнего красного канала, отвечающий за содержание хлорофилла и азота в листе. Нормализованный разностный водный индекс NDWI отражает изменения содержания влаги в растительном покрове, поскольку коэффициент отражения в зеленом и ближнем инфракрасном диапазонах имеет отличающиеся свойства по-

глощения воды. Значения рассмотренных вегетационных индексов варьируются от –1 до 1.

Общий вид исследованной области приведен на рис. 2. На рисунке местоположение каждого исследованного дерева выделено маркером, при этом разные цвета маркеров соответствуют деревьям, расположенным на различных площадках – западной, центральной и восточной. Отдельные изображения на рис. 2 соответствуют пяти каналам камеры и используемым вегетационным индексам.

Для оценивания мультиспектральных вегетационных индексов вокруг места произрастания каждого дерева была выделена область, в пять раз превышающая диаметр его наблюдаемой кроны. Для нежизнестойких деревьев и деревьев с истощенной кроной соответствующий диаметр кроны оценивался по диаметру ствола по приближенной модели [18]. В соответствующей области для каждого из анализируемых показателей были рассчитаны основные описательные статистики.

Для выявления статистически значимых различий вегетационных индексов был использован непараметрический критерий Крускала–Уоллиса, пороговый уровень значимости составлял 0.05. Статистически значимые расхождения между тремя характерными локальными участками изучаемой территории были выявлены как для средних значений, так и для среднеквадратических отклонений индексов NDVI, NDRE и NDWI.

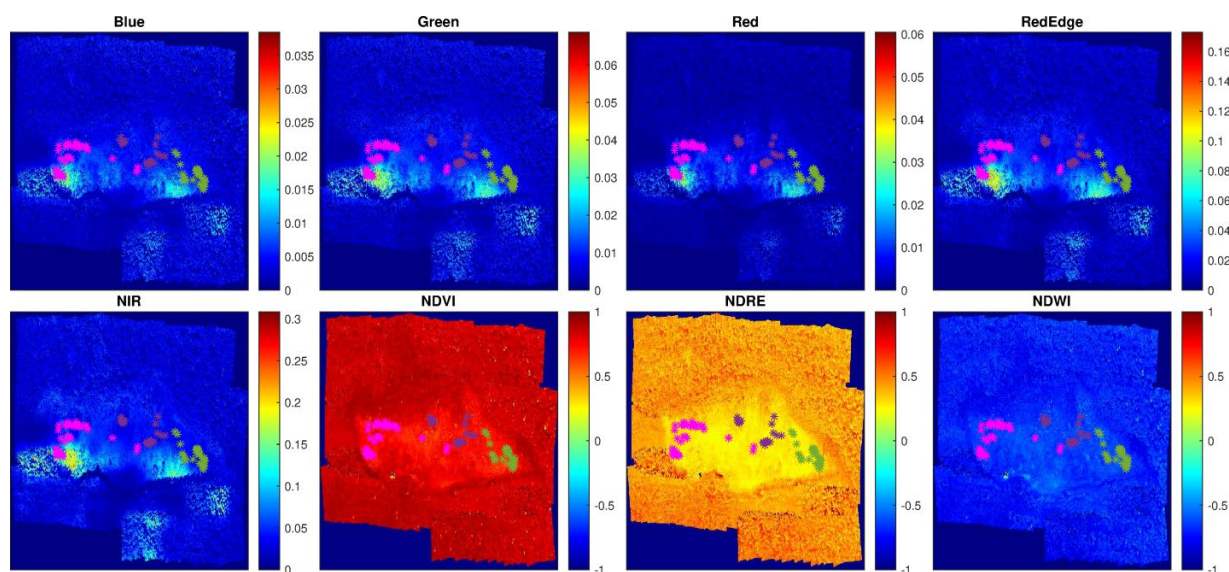


Рис. 2. Общий вид исследованной области при наблюдении с беспилотного летательного аппарата по данным мультиспектральной съемки

Fig. 2. General view of the studied area during unmanned aerial vehicle observation according to multispectral survey data

Взаимный корреляционный анализ прироста годовых колец и гидроклиматических показателей. Долгосрочные климатические записи и связанные с ними данные годовых колец демонстрируют сложное взаимодействие множества колебательных моделей и медленных трендов, что ограничивает применимость традиционных инструментов корреляционного и/или спектрального анализа.

С целью установления влияния климатических условий на прирост годовых колец деревьев был проведен мультимасштабный корреляционный анализ с удалением тренда методом СМА для временных рядов данных, соответствующих ширине годовых колец TRW, значениям индекса интенсивности засухи Палмера (Palmer Drought Severity Index) и температуры. Индекс интенсивности засухи Палмера относится к обобщенным индексам, определяющим баланс между потреблением и расходом влаги и учитывающим количество осадков, влажность почвы и воздуха, объем руслового стока, уровень подземных вод, высоту снежного покрова и иные показатели.

Размер окна скользящего среднего s , определяемый в годах, при выполнении процедуры удаления тренда в анализируемых рядах данных менялся от 2 до 128 лет. Анализировалась взаимосвязь прироста годовых колец с сезонными и годовыми рядами значений индекса засухи Палмера и температуры. Получаемые коэффициенты корреляции были обозначены, соответственно, PDSI и Temp. Результаты сравнения соответствующих коэффициентов корреляции по критерию Крускала–Уоллиса приведены на рис. 3 и 4. Порог уровня значимости был равен 0.05. Красными метками на рис. 3 и 4 отмечены уровни значимости, соответствующие статистически значимым отличиям между тремя участками изучаемой территории. Зелеными линиями на рис. 3 и 4 выделены совокупности боксовых диаграмм, для которых выявлены значимые отличия.

Как можно видеть из представленных на рис. 3 результатов, значимые отличия коэффициентов корреляции PDSI для трех площадок были определены для масштабов $s = 32, 64$ и 128 при использовании индекса засухи Палмера за каждый из сезонов (Winter, Spring, Sum-

mer, Autumn), так же, как и для годовых записей (Annual). Для масштаба $s = 4$ значимые отличия определены для записей, соответствующих осеннему и летнему сезонам.

Коэффициенты корреляции прироста годовых колец с температурой в зимний период для трех площадок значимо отличаются практически для всех масштабов s ; с температурой в весенний период – для масштабов $s = 64, s = 128$; с температурой осенью – для масштабов $s = 8, s = 16$.

Построение БС. Для создания БС все рассмотренные параметры были сначала объединены в три группы, включая глобальные гидроклиматические вариации (А), характеризующиеся коэффициентами корреляции PDSI и температуры, локальные гидрологические условия (Б), характеризующиеся мультиспектральными индексами, и условия и параметры роста деревьев (С), характеризующиеся данными годовых колец.

Чтобы уменьшить сложность модели, из нее были исключены все избыточные связи между параметрами с помощью трехэтапной процедуры. Сперва были отобраны только те параметры, для которых были выявлены значимые отличия в пределах трех характерных частей изучаемой территории. При построении графа на основании используемой корреляционной матрицы полных или частных корреляций выбирался порог, ниже которого корреляционные связи признавались несущественными. Затем некоторые связи были запрещены экспертной оценкой, чтобы учесть, что глобальные индексы (А) могут влиять на локальные условия (Б) и на рост и самочувствие деревьев (С), но не наоборот. Напротив, внутригрупповые связи допускались. Например, годовой прирост напрямую приводит к увеличению диаметра ствола, в то время как более старые деревья с большим диаметром ствола могут в определенные периоды жизни снижать скорость своего роста. На третьем этапе для создания графа, представляющего структуру БС, которая по определению подразумевает ориентированный ациклический граф, из модели были исключены оставшиеся петли. Для этого повторялась процедура, состоящая в нахождении любого существующего цикла и исключении в нем самого "слабого" звена до тех пор, пока результирующий граф не оказывался полностью ациклическим.

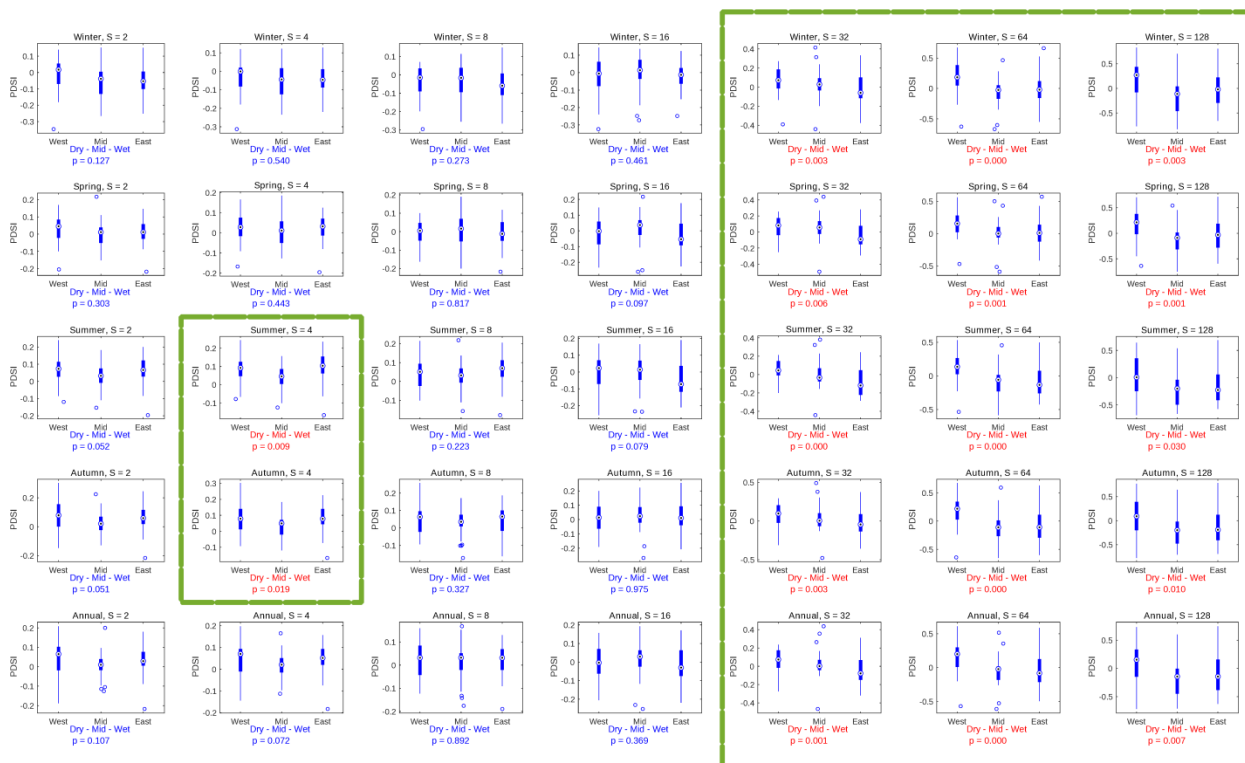


Рис. 3. Боксовые диаграммы коэффициентов корреляции прироста годовых колец с сезонными и годовыми данными индекса засухи Палмера

Fig. 3. Boxplots of the correlation coefficients of the tree rings growth and the seasonal and annual data of the Palmer drought index

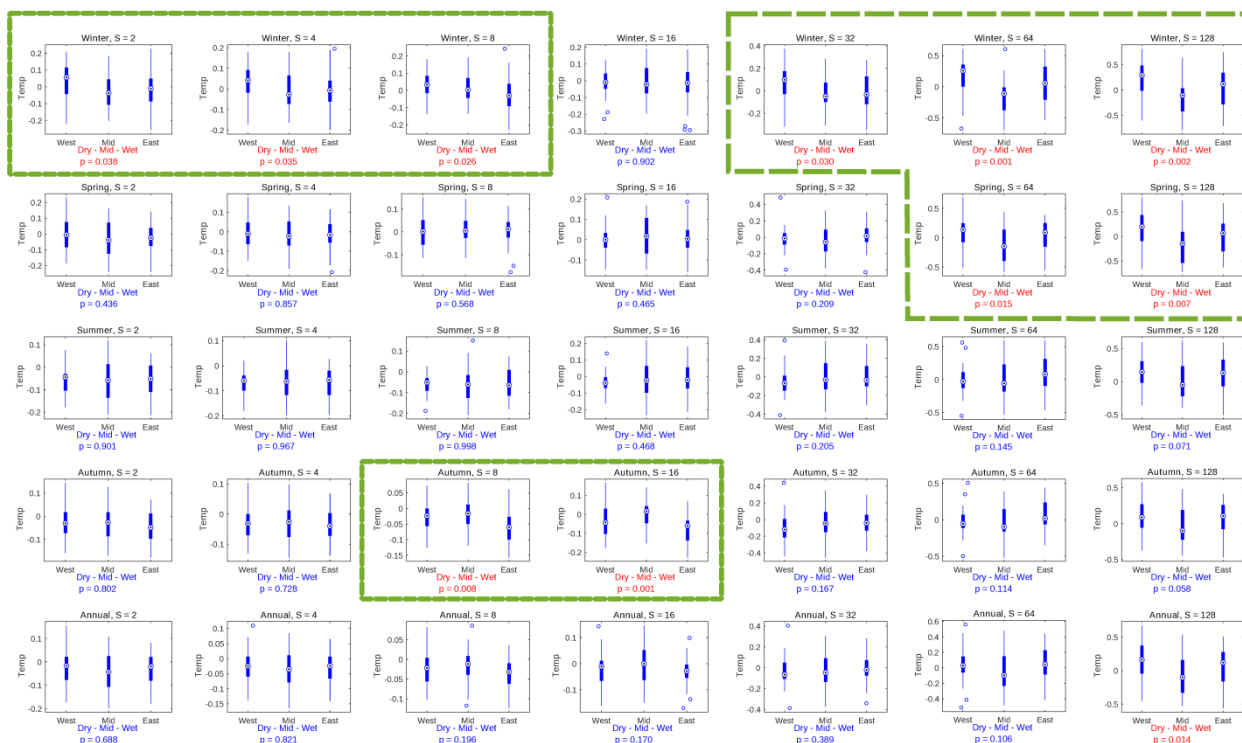


Рис. 4. Боксовые диаграммы коэффициентов корреляции прироста годовых колец с сезонными и годовыми данными температуры

Fig. 4. Boxplots of the correlation coefficients of the tree rings growth and the seasonal and annual data of the temperature

Хотя байесовские сетевые модели представляют собой распространенный инструмент для описания сложных взаимодействий в гетерогенных природных системах (см., например, [2, 7]), большинство доступных решений сосредоточено на полностью экспертно управляемом определении структуры сети. Напротив, быстро расширяющиеся и все более эффективные (хотя обычно требующие большого количества данных наблюдений для их начального обучения) подходы, основанные на машинном обучении, обычно фокусируются на полностью управляемых данными структурах, которые довольно часто оказываются трудно интерпретируемыми. Описанная трехэтапная процедура построения модели остается в промежуточной нише, поскольку она работает в терминах

обычных величин, допуская при этом ограниченное вмешательство экспертов в основном для устранения бессмысленных причинно-следственных связей.

На рис. 5 представлена БС, отражающая взаимосвязь рассмотренных параметров. Сеть параметризована коэффициентами корреляции Спирмена. Предполагаемые причинно-следственные связи направлены сверху вниз. Матрица коэффициентов корреляции Спирмена приведена на рис. 6.

Иной вариант построения графа можно получить, используя матрицу частных коэффициентов корреляции (рис. 7, 8). Предполагаемые причинно-следственные связи для графа, изображенного на рис. 7, направлены сверху вниз. Отличие графа на рис. 7 от графа, представлен-

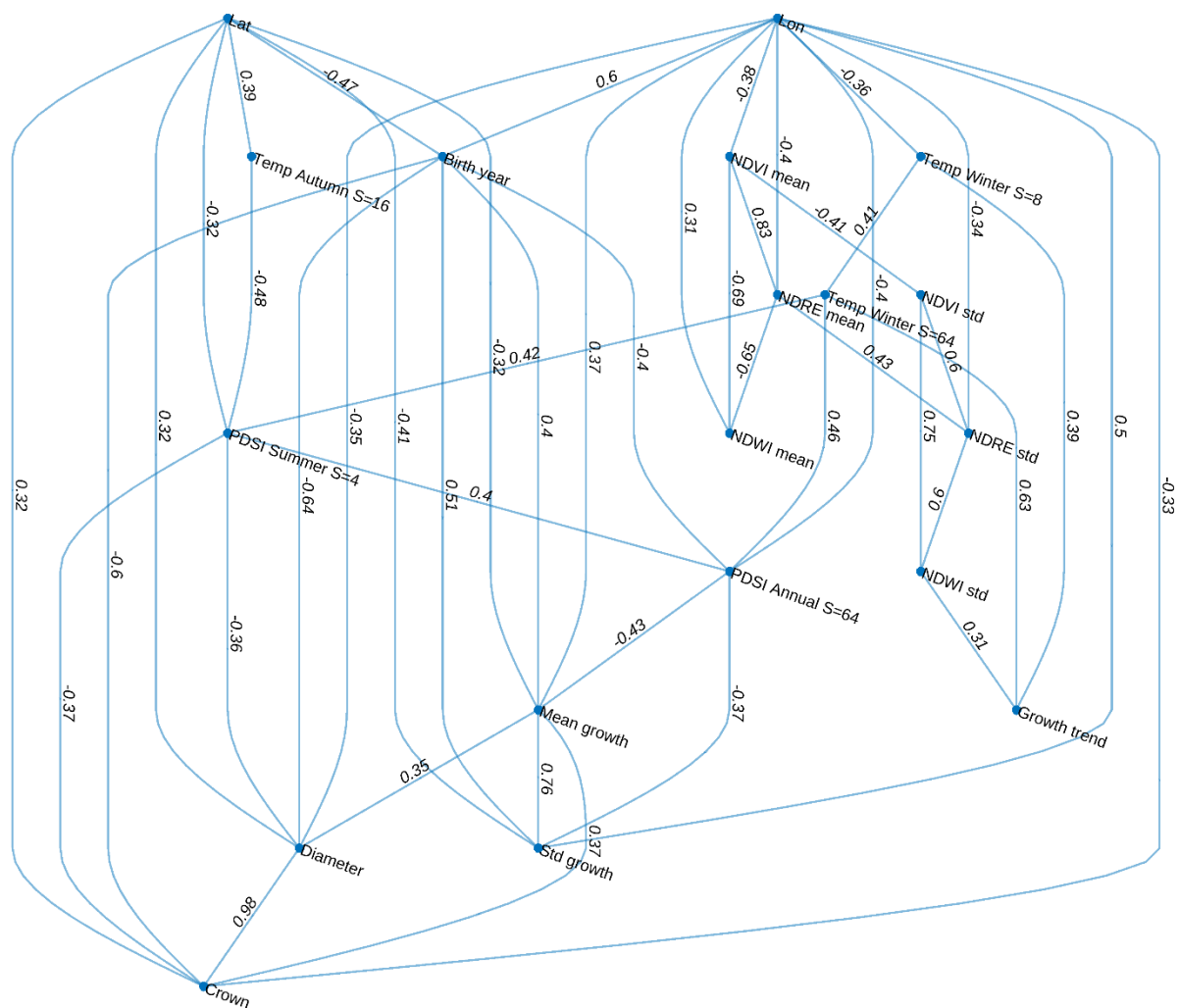


Рис. 5. Байесовская сеть, параметризованная корреляциями Спирмена между индексами гидроклиматической изменчивости, мультиспектральными индексами местной растительности и данными годовичных колец

Fig. 5. Bayesian network parameterized by Spearman correlations between hydroclimatic variability indices, multispectral local vegetation indices and tree ring data

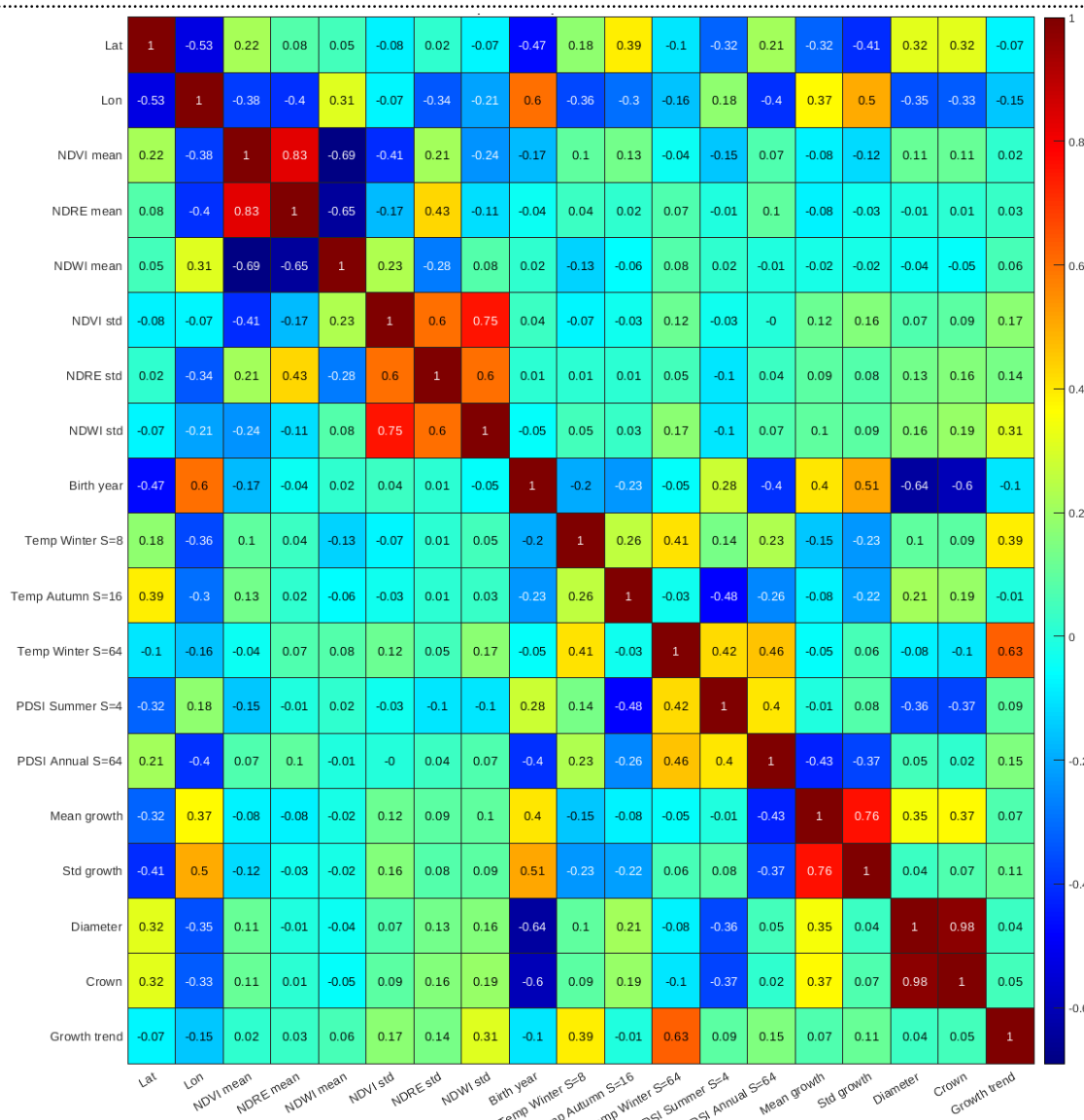


Рис. 6. Матрица коэффициентов корреляции Спирмена между рассмотренными параметрами

Fig. 6. Matrix of Spearman correlation coefficients between the considered parameters

ного на рис. 5, вызвано в первую очередь тем, что коэффициенты частной корреляции, как правило, имеют существенно меньшие значения, чем коэффициенты полной корреляции, за счет устранения общих влияний на анализируемые переменные. Например, когда на несколько параметров роста дерева влияют глобальный индекс гидроклиматических колебаний, такой как индекс засухи Палмера, и (или) вариации температуры, их влияние вносит дополнительный вклад в суммарные корреляции между всеми этими параметрами. При переходе к частным корреляциям этот дополнительный вклад исключается. Оставшиеся "внутренние" корреляции после устранения множественных перекрестных влияний зачастую уменьшаются,

и ими можно пренебречь без существенной потери точности модели. При этом структура графа изменяется.

Существенным достоинством БС является возможность их использования для прогнозирования показателей, представляющих интерес для исследователей. На рис. 9 приведены результаты прогнозирования диаметра ствола (Trunk diameter), диаметра кроны (Crown diameter) и тренда прироста годичных колец (Growth trend) на основе данных дистанционного зондирования и коэффициентов корреляции прироста годичных колец с индексом засухи Палмера (PDSI) и температурой (Temp). Для прогнозирования использована БС (рис. 5), однако данные среднего прироста (Mean growth)

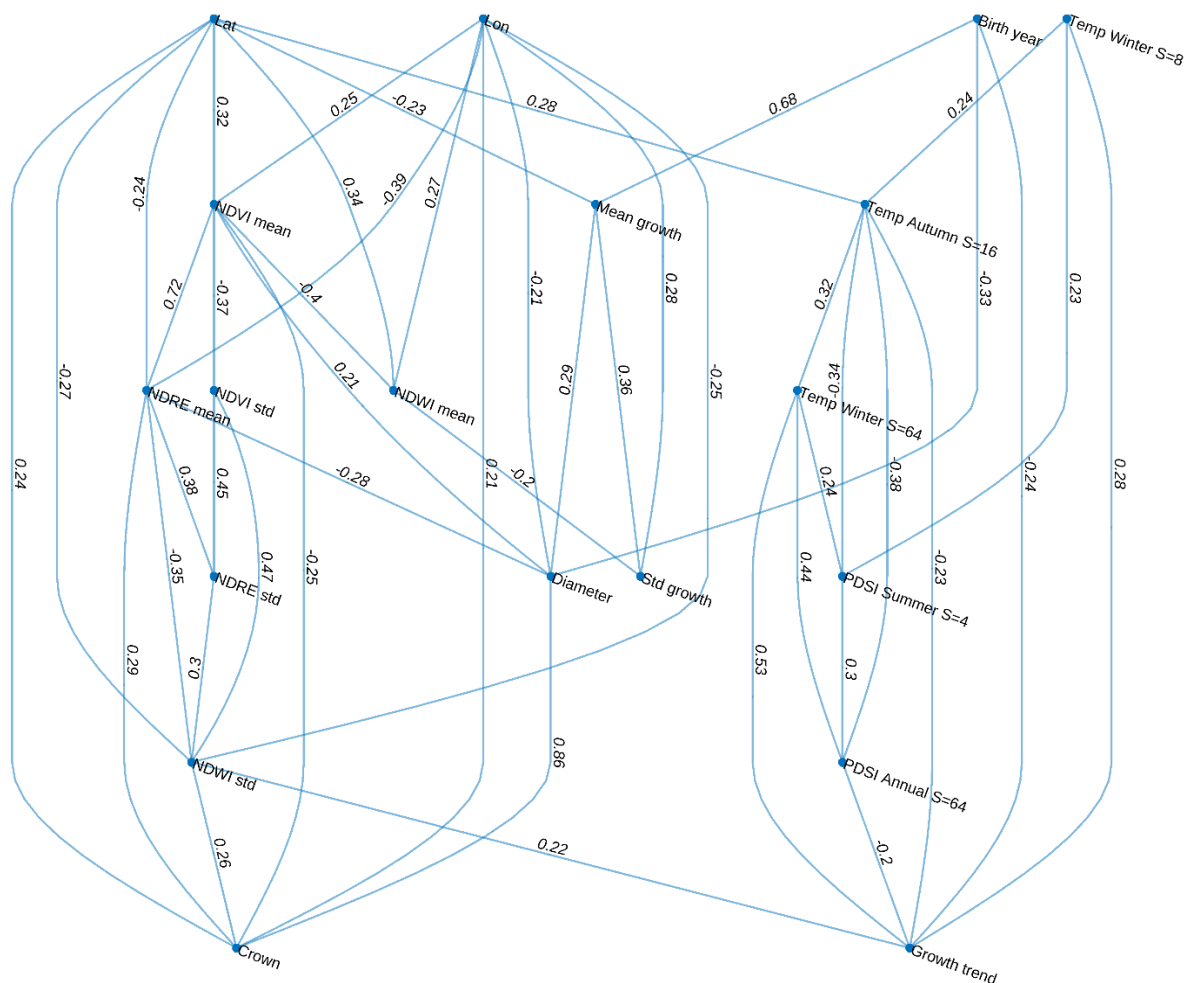


Рис. 7. Байесовская сеть, параметризованная частными корреляциями Спирмена между индексами гидроклиматической изменчивости, мультиспектральными индексами местной растительности и данными годовичных колец

Fig. 7. Bayesian network parameterized by partial Spearman correlations between hydroclimatic variability indices, multispectral local vegetation indices and tree ring data

и среднеквадратического отклонения прироста годовичных колец (Std growth) исключены из числа предикторов, поскольку их влияние на рассматриваемые целевые показатели очевидно. Для улучшения регрессионной модели удалены выбросы, к которым отнесены значения, превышающие три медианных абсолютных отклонения. На рис. 9 синими маркерами показаны значения, абсциссы которых соответствуют наблюдаемым показателям, а ординаты – их предсказываемым значениям. Красными маркерами обозначены выбросы. Синие штриховые линии соответствуют линиям регрессии до удаления выбросов, красные линии – линиям регрессии после удаления выбросов. В верхней части рисунка приведены полученные значения коэффициентов корреляции реальных и прогнозируемых значений до и после удаления выбросов. Приведенные значения коэффициен-

тов корреляции представляют собой квадратный корень из коэффициентов детерминации, характеризующих качество регрессии.

Как можно видеть, полученные коэффициенты корреляции превышают значения 0.6, а в случае анализа тренда прироста годовичных колец стремятся к значению 0.8, что позволяет считать качество прогнозирования вполне приемлемым.

Закключение. Изменение климата является одной из глобальных проблем современности. Лесные экосистемы вносят определяющий вклад в локальный микроклимат, снижая как абсолютный нагрев, так и размах суточных колебаний температуры, и, таким образом, в значительной мере определяют сбалансированность окружающей среды и благополучие экотона в целом. Представленная работа направлена на частичную автоматизацию мониторинга

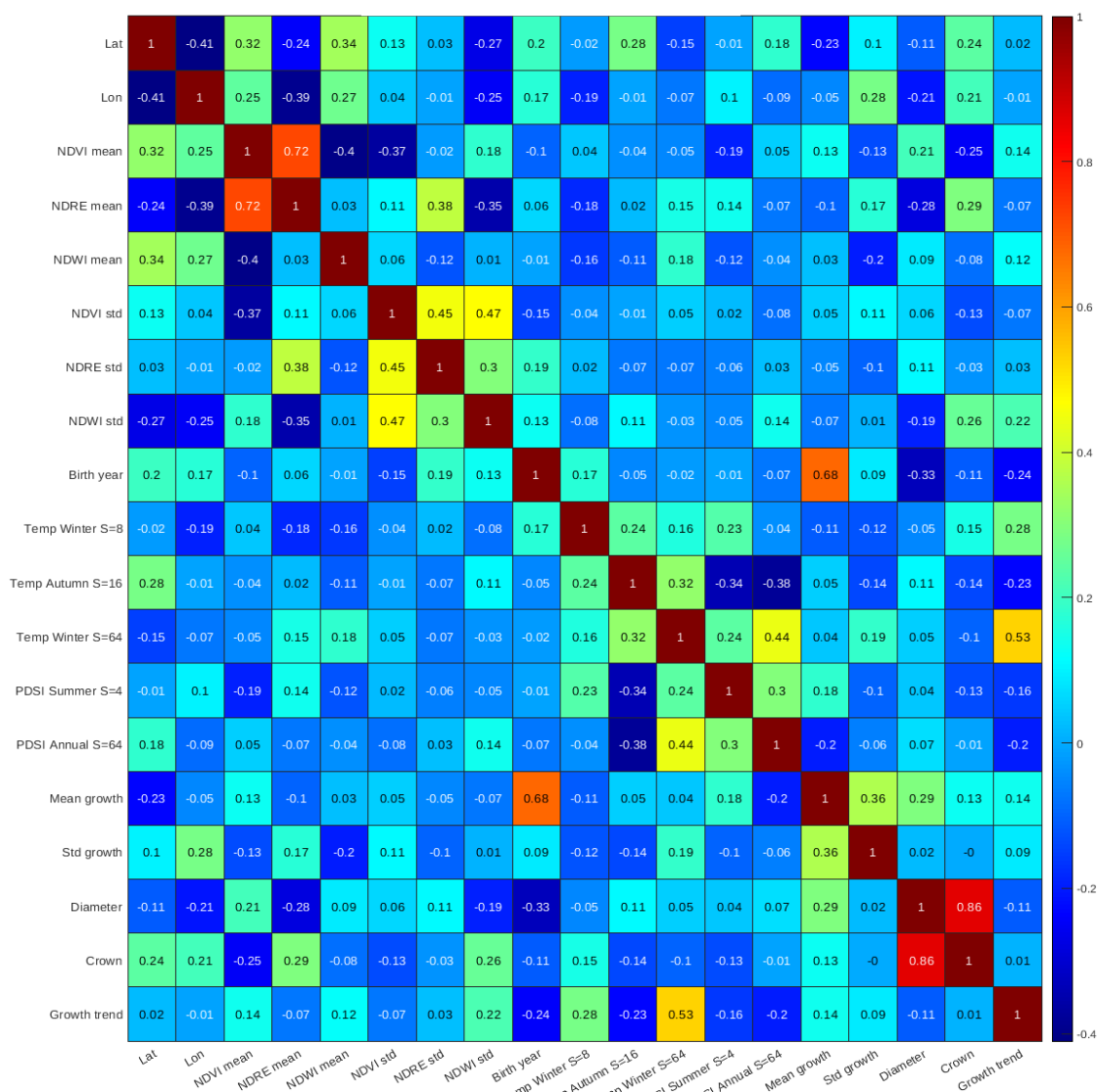


Рис. 8. Матрица частных коэффициентов корреляции Спирмена между рассмотренными параметрами

Fig. 8. Matrix of partial Spearman correlation coefficients between the considered parameters

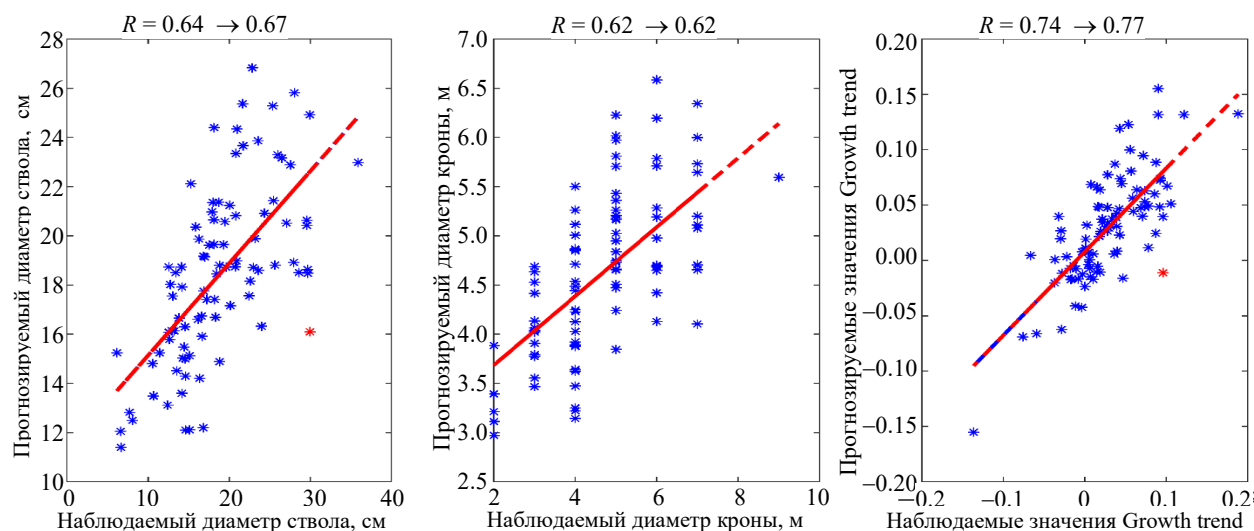


Рис. 9. Линейные регрессии, отражающие связь наблюдаемых и прогнозируемых показателей

Fig. 9. Linear regressions showing the relationship between observed and predicted indicators

благополучия лесного фонда на примере исследования территории сфагнового болота и анализа роста сосны обыкновенной.

Параметры, характеризующие рост и текущее состояние деревьев в области анализа, были получены с помощью дендрологических измерений. Для выбранного региона исследований характерны риски усыхания деревьев вследствие продолжительных засух. Поэтому многолетние данные прироста годовых колец деревьев были рассмотрены в комплексе с данными изменения температуры и индекса засухи Палмера. Для выявления взаимосвязи указанных показателей был проведен мультимасштабный взаимный корреляционный анализ с удалением тренда.

На основании мультиспектрального дистанционного зондирования исследуемой территории были определены вегетационные индексы, характеризующие локальные гидрологические условия.

Проведенный статистический анализ позволил выделить показатели, значимо отличающиеся для трех площадок в зоне исследования,

отличающихся градиентом высот и степенью увлажнения. Для выявленного набора показателей были построены НПБС, параметризованные как полными, так и частными коэффициентами корреляции Спирмена. Построенные НПБС могут быть использованы как для анализа и визуализации, так и для прогнозирования состояния лесных насаждений.

Полученные результаты показывают, что слабый контраст увлажненности в зонах исследований тем не менее явно отразился на динамике роста деревьев, включая изменение их связи с жарой и уровнем засухи. Это подчеркивает важность местных гидрологических условий для сохранения и благополучия лесных экосистем при повышенной нагрузке на окружающую среду и должно учитываться при планировании экологического управления. Предложенная байесовская сетевая модель отражает взаимосвязи между различными факторами, влияющими на лесную экосистему, и может использоваться для оценки рисков и улучшения планирования экологического управления.

Авторский вклад

Пыко Никита Сергеевич – выполнение статистического анализа данных, разработка математической модели, визуализация и статистическая оценка значимости полученных результатов.

Тишин Денис Владимирович – планирование и выполнение экспериментальных работ, дендрологическая и гидроклиматическая характеристика участка исследований, анализ годового прироста деревьев.

Искандиров Павел Юрьевич – выполнение наземных дендрологических исследований.

Гафуров Артур Маратович – планирование и первичная обработка данных дистанционного зондирования.

Усманов Булат Мансурович – выполнение дистанционного зондирования с использованием БПЛА.

Богачев Михаил Игоревич – разработка концепции исследований и интерпретация результатов.

Author's contribution

Nikita S. Pyko, implementation of the statistical data analysis, development of the mathematical model, visualization and statistical evaluation of the significance of the obtained results.

Denis V. Tishin, planning and implementation of experimental work, dendrological and hydroclimatic description of the study area, analysis of the annual growth of trees.

Pavel Yu. Iskandirov, implementation of the ground-based dendrological studies.

Artur M. Gafurov, planning and primary processing of remote sensing data.

Bulat M. Usmanov, remote sensing using UAVs.

Mikhail I. Bogachev, development of the research concept and interpretation of the results.

Список литературы

1. Monitoring cliff erosion with LiDAR surveys and Bayesian network-based data analysis / P. Terefenko, D. Paprotny, A. Giza, O. Morales-Nápoles, A. Kubicki, S. Walczakiewicz // Remote Sens. 2019. № 11. P. 843. doi: 10.3390/rs11070843

2. Paprotny D., Morales-Nápoles O. Estimating extreme river discharges in europe through a Bayesian network // Hydrology and Earth System Sciences.

2017. Vol. 21, № 6. P. 2615–2636. doi: 10.5194/hess-21-2615-2017

3. A continuous Bayesian network for earth dams' risk assessment: An application / D.-J. Delgado-Hernández, O. Morales-Nápoles, D. De-León-Escobedo, J.-C. Arteaga-Arcos // Structure and Infrastructure Engineering. 2014. Vol. 10, № 2. P. 225–238. doi: 10.1080/15732479.2012.731416

4. Morales Nápoles O., Steenbergen R. Analysis of axle and vehicle load properties through Bayesian networks based on weigh-in-motion data // Reliability Engineering & System Safety. 2014. Vol. 125. P. 153–164. doi: 10.1016/j.res.2014.01.018

5. Cooke R. M., Wielicki B. Probabilistic reasoning about measurements of equilibrium climate sensitivity: Combining disparate lines of evidence // Climatic Change. 2018. № 151. P. 541–154. doi: 10.1007/s10584-018-2315-y

6. Overview on Bayesian Network applications for dependability, risk analysis and maintenance areas / P. Weber, G. Medina-Oliva, C. Simon, B. Iung // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2012. Vol. 25, № 4. P. 671–682. doi: 10.1016/j.engappai.2010.06.002

7. Hanea A., Morales Nápoles O., Ababei D. Non-parametric Bayesian networks: Improving theory and reviewing applications // Reliability Engineering & System Safety. 2015. Vol. 144. P. 265–284. doi: 10.1016/j.res.2015.07.027

8. Morales O., Kurowicka D., Roelen A. Eliciting conditional and unconditional rank correlations from conditional probabilities // Reliability Engineering & System Safety. 2008. Vol. 93, № 5. P. 699–710. doi: 10.1016/j.res.2007.03.020

9. Baba K., Shibata R., Sibuya M. Partial correlation and conditional correlation as measures of conditional independence // Australian & New Zealand J. of Statistics. 2004. Vol. 46, № 4. P. 657–664. doi: 10.1111/j.1467-842X.2004.00360.x

10. Baba K., Sibuya M. Equivalence of Partial and Conditional Correlation Coefficients // J. of the Japan Statistical Society. 2005. Vol. 35, № 1. P. 1–19. doi: 10.14490/JJSS.35.1

11. Detrended partial-cross-correlation analysis: a new method for analyzing correlations in complex

system / N. Yuan, Z. Fu, H. Zhang, L. Piao, J. Luterbacher // Scientific reports. 2015. Vol. 5, № 1. P. 8143. doi: 10.1038/srep08143

12. Detrended Partial Cross-Correlation Analysis of Two Nonstationary Time Series Influenced by Common External Forces / X.-Yu. Qian, Y.-M. Liu, Zh.-Q. Jiang, B. Podobnik, W.-X. Zhou, H. E. Stanley // Physical Review. 2015. Vol. 91. P. 06281. doi: 10.1103/PhysRevE.91.062816

13. Zhou W. X. Multifractal detrended cross-correlation analysis for two nonstationary signals // Physical Review E. 2008. Vol. 77. P. 066211. doi: 10.1103/PhysRevE.77.066211

14. Horvatic D., Stanley H. E., Podobnik B. Detrended cross-correlation analysis for non-stationary time series with periodic trends // Europhysics Let. 2011. Vol. 94, № 1. P. 18007. doi: 10.1209/0295-5075/94/18007

15. Alvarez-Ramirez J., Rodriguez E., Echeverría J. C. Detrending fluctuation analysis based on moving average filtering // Physica A: statistical mechanics and its applications. 2005. Vol. 354. P. 199–219. doi: 10.1016/j.physa.2005.02.020

16. Rinn F. TSAP-Win time series analysis and presentation for dendrochronology and related applications // User Reference Version 0.53. Heidelberg: Rinntech, 2005. P. 1–88.

17. Article Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images / S. Candiago, F. Remondino, M. De Giglio, M. Dubbini, M. Getteli // Remote Sens. 2015. Vol. 7, № 4. P. 4026–4047. doi: 10.3390/rs70404026

18. Pyataev A. S., Vais A. A. Pine Crown and Trunk Diameter Dependence Research // CEUR Workshop Proc. 2019. P. 160–165.

Информация об авторах

Пыко Никита Сергеевич – магистр по направлению "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" (СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2019), аспирант кафедры радиотехнических систем, младший научный сотрудник научно-образовательного центра "Цифровые телекоммуникационные системы" Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 36 научных работ. Сфера научных интересов – статистический анализ данных; математическое моделирование.

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

E-mail: goststalker13@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6668-9512>

Тишин Денис Владимирович – кандидат биологических наук (2006), доцент кафедры общей экологии Института экологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета, старший научный сотрудник Информационно-методического центра факультета компьютерных технологий и информатики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 62 научных работ. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; электрокалорический эффект; пьезоэлектрический эффект; мультиферроики.

Адрес: Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, д. 18/1, Казань, 420008, Россия

E-mail: kpfuecology@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4790-2840>

Искандиров Павел Юрьевич – эколог по специальности "Экология" (КФУ, 2013), аспирант кафедры общей экологии Института экологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета. Автор 12 научных работ. Сфера научных интересов – дендрохронология; фенология.

Непараметрические байесовские сети как инструмент комплексирования данных

multimasshtabnogo analiza vremennykh ryadov i distantsionnogo zondirovaniya

Nonparametric Bayesian Networks as a Tool of Multiscale Time Series Analysis

and Remote Sensing Data Integration

Адрес: Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, д. 18/1, Казань, 420008, Россия
E-mail: iskandirovpj@stud.kpfu.ru
<https://orcid.org/0009-0004-3824-6708>

Гафуров Артур Маратович – старший преподаватель кафедры ландшафтной экологии Института экологии и природопользования, старший научный сотрудник Научно-исследовательского центра превосходства киберфизических систем Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета. Автор 50 научных работ. Сфера научных интересов – геоморфология и эволюционная география; геоэкология; аэрокосмические исследования Земли; фотограмметрия.

Адрес: Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, д. 18/1, Казань, 420008, Россия
E-mail: AMGafurov@kpfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0812-1750>

Усманов Булат Мансурович – старший преподаватель кафедры ландшафтной экологии Института экологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета. Автор 72 научных работ. Сфера научных интересов – геоморфология и эволюционная география; геоэкология; аэрокосмические исследования Земли; фотограмметрия.

Адрес: Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, д. 18/1, Казань, 420008, Россия
E-mail: BUsmanof@kpfu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9354-1348>

Богачев Михаил Игоревич – доктор технических наук (2018), доцент (2011) кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 200 научных работ. Сфера научных интересов – статистический анализ данных; математическое моделирование.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: rogex@yandex.com
<https://orcid.org/0000-0002-0356-5651>

References

1. Terefenko P., Paprotny D., Giza A., Morales-Nápoles O., Kubicki A., Walczakiewicz S. Monitoring Cliff Erosion with LiDAR Surveys and Bayesian Network-Based Data Analysis. *Remote Sens.* 2019, no. 11, p. 843. doi: 10.3390/rs11070843
2. Paprotny D., Morales-Nápoles O. Estimating Extreme River Discharges in Europe Through a Bayesian Network. *Hydrology and Earth System Sciences.* 2017, vol. 21, no. 6, pp. 2615–2636. doi: 10.5194/hess-21-2615-2017
3. Delgado-Hernández D.-J., Morales-Nápoles O., De-León-Escobedo D., Arteaga-Arcos J.-C. A Continuous Bayesian Network for Earth Dams' Risk Assessment: An Application. *Structure and Infrastructure Engineering.* 2014, vol. 10, no. 2, pp. 225–238. doi: 10.1080/15732479.2012.731416
4. Morales Nápoles O., Steenbergen R. Analysis of Axle and Vehicle Load Properties through Bayesian Networks Based on Weigh-in-Motion Data. *Reliability Engineering & System Safety.* 2014, vol. 125, pp. 153–164. doi: 10.1016/j.ress.2014.01.018
5. Cooke R. M., Wielicki B. Probabilistic Reasoning about Measurements of Equilibrium Climate Sensitivity: Combining Disparate Lines of Evidence. *Climatic Change.* 2018, no. 151, pp. 541–154. doi: 10.1007/s10584-018-2315-y
6. Weber P., Medina-Oliva G., Simon C., Iung B. Overview on Bayesian Network Applications for Dependability, Risk Analysis and Maintenance Areas. *Engineering Applications of Artificial Intelligence.* 2012, vol. 25, no. 4, pp. 671–682. doi: 10.1016/j.engappai.2010.06.002
7. Hanea A., Morales Nápoles O., Ababei D. Non-parametric Bayesian Networks: Improving Theory and Reviewing Applications. *Reliability Engineering & System Safety.* 2015, vol. 144, pp. 265–284. doi: 10.1016/j.ress.2015.07.027
8. Morales O., Kurowicka D., Roelen A. Eliciting Conditional and Unconditional Rank Correlations from Conditional Probabilities. *Reliability Engineering & System Safety.* 2008, vol. 93, no. 5, pp. 699–710. doi: 10.1016/j.ress.2007.03.020
9. Baba K., Shibata R., Sibuya M. Partial Correlation and Conditional Correlation as Measures of Conditional Independence. *Australian & New Zealand J. of Statistics.* 2004, vol. 46, no. 4, pp. 657–664. doi: 10.1111/j.1467-842X.2004.00360.x
10. Baba K., Sibuya M. Equivalence of Partial and Conditional Correlation Coefficients. *J. of the Japan Statistical Society.* 2005, vol. 35, no. 1, pp. 1–19. doi: 10.14490/JJSS.35.1
11. Yuan N., Fu Z., Zhang H., Piao L., Luterbacher J. Detrended Partial-Cross-Correlation Analysis: A New Method for Analyzing Correlations in Complex System. *Scientific Reports.* 2015, vol. 5, no. 1, p. 8143. doi: 10.1038/srep08143
12. Qian X.-Yu., Liu Y.-M., Jiang Zh.-Q., Podobnik B., Zhou W.-X., Stanley H. E. Detrended Partial Cross-Correlation Analysis of Two Nonstationary Time Series Influenced by Common External Forces. *Physi-*

cal Review. 2015, vol. 91, p. 06281. doi: 10.1103/PhysRevE.91.062816

13. Zhou W. X. Multifractal Detrended Cross-Correlation Analysis for Two Nonstationary Signals. *Physical Review E*. 2008, vol. 77, p. 066211. doi: 10.1103/PhysRevE.77.066211

14. Horvatic D., Stanley H. E., Podobnik B. Detrended Cross-Correlation Analysis for Non-Stationary Time Series with Periodic Trends. *Europhysics Let.* 2011, vol. 94, no. 1, p. 18007. doi: 10.1209/0295-5075/94/18007

15. Alvarez-Ramirez J., Rodriguez E., Echeverría J. C. Detrending Fluctuation Analysis Based on Moving Average Filtering. *Physica A: Statistical Me-*

chanics and Its Applications. 2005, vol. 354, pp. 199–219. doi: 10.1016/j.physa.2005.02.020

16. Rinn F. TSAP-Win Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications. User Reference Version 0.53. Heidelberg, Rinntech, 2005, pp. 1–88.

17. Candiago S., Remondino F., De Giglio M., Dubbini M., Gettelli M. Article Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. *Remote Sens*. 2015, vol. 7, no. 4, pp. 4026–4047. doi: 10.3390/rs70404026

18. Pyataev A. S., Vais A. A. Pine Crown and Trunk Diameter Dependence Research. *CEUR Workshop Proc.* 2019, pp. 160–165.

Information about the authors

Nikita S. Pyko, Master in information and communication technology (2019), Postgraduate Student of the Department of Radio Engineering Systems, Junior Researcher at the Scientific and Educational Center "Digital Telecommunication Technologies" of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 36 scientific publications. Area of expertise: statistical data analysis, mathematical modeling.

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

E-mail: goststalker13@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6668-9512>

Denis V. Tishin, Can. Sci. (Biol.) (2006), Associate Professor of the Department of General Ecology of the Institute of Environmental Sciences of Kazan Federal University, Senior Researcher at the IMC FKTI of Saint Petersburg Electrotechnical University. Author of 62 scientific publications. Area of expertise: dendrochronology, phenology, dendroclimatology, paleoecology, carbon balance.

Address: Kazan Federal University, 18/1, Kremlyovskaya St., Kazan 420008, Russia

E-mail: kpfuecology@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4790-2840>

Pavel Yu. Iskandirov, Ecologist (KFU, 2013), Postgraduate Student of the Department of General Ecology of the Institute of Environmental Sciences of Kazan Federal University. The author of 12 scientific publications. Area of expertise: dendrochronology, phenology.

Address: Kazan Federal University, 18/1, Kremlyovskaya St., Kazan 420008, Russia

E-mail: iskandirovpj@stud.kpfu.ru

<https://orcid.org/0009-0004-3824-6708>

Artur M. Gafurov, Senior Lecturer at the Department of Landscape Ecology of the Institute of Environmental Sciences, Senior Researcher of the Research Center for Superiority of Cyber-Physical Systems of the Institute of Physics of Kazan Federal University. The author of 50 scientific publications. Area of expertise: geomorphology and evolutionary geography, geoecology, aerospace research of the Earth, photogrammetry.

Address: Kazan Federal University, 18/1, Kremlyovskaya St., Kazan 420008, Russia

E-mail: AMGafurov@kpfu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0812-1750>

Bulat M. Usmanov, Senior Lecturer at the Department of Landscape Ecology of the Institute of Environmental Sciences of Kazan Federal University. The author of 72 scientific publications. Area of expertise: geomorphology and evolutionary geography, geoecology, aerospace research of the Earth, photogrammetry.

Address: Kazan Federal University, 18/1, Kremlyovskaya St., Kazan 420008, Russia

E-mail: BUzmanof@kpfu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9354-1348>

Mikhail I. Bogachev, Dr Sci. (Eng.) (2018), Associate Professor (2011) at the Department of Radio Engineering Systems, Chief Researcher of the Scientific and Educational Center "Digital Telecommunication Technologies" of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 200 scientific publications. Area of expertise: statistical data analysis, mathematical modeling.

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

E-mail: rogex@yandex.com

<https://orcid.org/0000-0002-0356-5651>

Тонкие пленки диоксида ванадия для применения в СВЧ-ключаях с электрическим управлением

И. Д. Неустроев, Т. К. Легкова, А. А. Цымбалюк, А. Е. Комлев✉

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

✉ aekomlev@etu.ru

Аннотация

Введение. Ввиду постоянно растущих требований к пропускной способности беспроводных систем связи все более востребованным становится применение перестраиваемых или коммутирующих устройств, выполненных на основе СВЧ-ключей. В настоящее время актуальным направлением является разработка СВЧ-ключей на основе нелинейных материалов, например диоксида ванадия. Ключи на основе данного материала имеют планарную конструкцию, которая вследствие своей простоты может быть широко востребована при создании СВЧ-устройств по гибридной технологии.

Цель работы. Исследование свойств тонких пленок диоксида ванадия и разработка конструкции СВЧ-ключа с электрическим переключением на их основе.

Материалы и методы. Экспериментальные образцы тонких пленок диоксида ванадия получены методом магнетронного распыления. Результаты экспериментального исследования параметров фазового перехода образцов материала были использованы при компьютерном моделировании планарной двухэлектродной структуры СВЧ-ключа методом конечных элементов.

Результаты. Изготовлены экспериментальные образцы пленок диоксида ванадия и исследованы зависимости их удельного сопротивления от температуры. Показано, что у полученных пленок изменение сопротивления достигает трех порядков. Разработана конструкция ключа на основе пленок диоксида ванадия. Проведено моделирование формирования токопроводящего канала в пленках диоксида ванадия при подаче управляющего напряжения. Получены оценки порогового напряжения элемента в зависимости от его конструктивных параметров.

Заключение. Использование экспериментальных данных как основы для компьютерного моделирования позволило определить пороговые значения токов, зависящих от топологии и конструкции СВЧ-ключа. Результаты моделирования структуры СВЧ-ключа показали, что сформированный токопроводящий канал имеет четко выраженные границы как по распределению плотности тока, так и по распределению температуры на поверхности пленки.

Ключевые слова: диоксид ванадия, фазовый переход, компьютерное моделирование, управляемые СВЧ-элементы

Для цитирования: Тонкие пленки диоксида ванадия для применения в СВЧ-ключаях с электрическим управлением / И. Д. Неустроев, Т. К. Легкова, А. А. Цымбалюк, А. Е. Комлев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 3. С. 48–57. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-48-57

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 22-29-01607.

Статья поступила в редакцию 28.11.2022; принята к публикации после рецензирования 24.04.2023; опубликована онлайн 29.06.2023

Thin Vanadium Dioxide Films for Use in Microwave Keys with Electric Control

Ilya D. Neustroev, Tatyana K. Legkova, Andrey A. Tsymbalyuk, Andrey E. Komlev✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ aekomlev@etu.ru

Abstract

Introduction. In view of the ever-tightening bandwidth requirements for wireless communication systems, the use of tunable or switching devices based on microwave keys is becoming increasingly popular. Currently, the development of microwave keys based on nonlinear materials, such as vanadium dioxide, is a relevant research direction. The keys based on this material are distinguished by a planar and simple design, thus being suitable for creating microwave devices using hybrid technology.

Aim. To study the properties of thin vanadium dioxide films and to develop a microwave switch with electrical switching on their basis.

Materials and methods. Experimental samples of thin vanadium dioxide films were obtained by magnetron sputtering. The phase transition parameters of the samples obtained experimentally were used in computer simulation of a planar two-electrode structure of a microwave key by the finite element method.

Results. Experimental samples of vanadium dioxide films were manufactured, and the dependences of their resistivity on temperature were studied. The resistance of the obtained vanadium dioxide films was found to change three-fold. A microwave key design based on vanadium dioxide films was developed. The formation of a current-conducting channel in vanadium dioxide films was simulated when a control voltage was applied. The threshold voltage of the element was estimated depending on its design parameters.

Conclusion. The use of experimental data as a basis for computer simulation made it possible to determine the threshold values of currents depending on the topology and design of the proposed microwave key. The results of simulating the key structure showed the formed conductive channel to have clearly defined boundaries in terms of distribution of both current density and temperature across the film surface.

Keywords: vanadium dioxide, phase transition, computer simulation, controlled microwave elements

For citation: Neustroev I. D., Legkova T. K., Tsymbalyuk A. A., Komlev A. E. Thin Vanadium Dioxide Films for Use in Microwave Keys with Electric Control. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 3, pp. 48–57. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-48-57

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

Acknowledgements. This work is supported by the Russian Science Foundation under grant № 22-29-01607.

Submitted 28.11.2022; accepted 24.04.2023; published online 29.06.2023

Введение. Последние десятилетия можно охарактеризовать активным ростом требований к увеличению пропускной способности беспроводных систем связи, влекущих за собой развитие новых стандартов связи [1–3]. Разработка и концептуальное развитие идеи сети пятого поколения (5G) значительно повысили внимание исследователей к развитию элементной базы с рабочими частотами значительно выше 10 ГГц, вплоть до миллиметровых волн [4–6]. Кроме того, из-за постоянно растущих требований к скорости беспроводной передачи данных все более востребован-

ными становятся широкополосные и сверхширокополосные устройства [7, 8], а также возрастает необходимость поддержки нескольких частотных диапазонов. Существующие решения телекоммуникационных архитектур основаны на различных схемах мультиплексирования каналов связи, что приводит к необходимости использования коммутирующих устройств. В СВЧ-диапазоне основой коммутирующего устройства можно считать СВЧ-ключи, широко используемые для настройки перестраиваемых антенн, усилителей и многополосных фильтров [9–11].

В настоящее время полупроводниковую технологию можно назвать одной из доминирующих технологий в радиочастотных переключателях. Например, технологии, основанные на комплементарной структуре металлооксид-полупроводник (КМОП) с использованием изолирующих подложек и низковольтных транзисторов со сложенными затворами, могут быть использованы для получения переключателей с низкими потерями и высокой мощностью [12]. Технология КМОП широко доступна, что делает ее привлекательной для производства радиочастотных переключателей и устройств на их основе. Однако ввиду ряда особенностей их широкое применение ограничивается нижней частью СВЧ-диапазона. Еще одним примером СВЧ-ключей на основе полупроводниковой технологии являются *pin*-диоды. Их достоинства – высокая линейность и возможность коммутации большого уровня мощности. Для улучшения изоляции иногда используют несколько последовательно соединенных *pin*-диодов, что негативно сказывается на вносимом затухании. К тому же схемы на *pin*-диодах требуют больших токов управления, что делает их малоприменимыми для использования в портативных приборах [13]. Следующим примером СВЧ-ключей являются микроэлектромеханические элементы (МЭМ-ключи). Переключатель МЭМ – это миниатюрное устройство, которое за счет механического перемещения кантилевера обеспечивает токопроводящее (ON) или изолирующее (OFF) состояние линии передачи. Основные недостатки МЭМ-ключей – невысокая скорость переключения (1...100 мкс) и малая мощность (<2 Вт) [14–16].

Помимо отмеченных конструкций в научных работах рассматриваются варианты создания СВЧ-ключей на основе нелинейных материалов, которые могут быть лишены указанных недостатков. Одним из таких материалов является диоксид ванадия [17, 18]. Данный материал обладает фазовым переходом, сопровождающимся значительным изменением электрических и оптических свойств. В частности, изменение удельного сопротивления может достигать пяти порядков [19]. При этом переход из высокоомного (диэлектрического) состояния в

низкоомное (проводящее) возможен вследствие целого ряда воздействующих факторов: теплового, электрического, оптического, механического [18, 19]. В данной статье рассматривается вариант планарной конструкции ключа на основе тонких пленок диоксида ванадия с электрическим управлением. Представленная конструкция может быть использована при создании СВЧ-устройств по гибридной технологии. Рассмотрена топология электродов элемента, а также исследованы особенности формирования токопроводящего канала. Представленные результаты моделирования основаны на экспериментально полученных характеристиках изготовленных образцов пленок диоксида ванадия.

Материалы и методы. *Получение тонких пленок диоксида ванадия.* Для синтеза пленок диоксида ванадия использован метод реактивного магнетронного распыления металлической мишени на постоянном токе в смеси аргона и кислорода. Изменение параметров осаждения (в частности, массового расхода кислорода) позволяет гибко управлять фазовым и химическим составами покрытий, получая пленки заданного стехиометрического состава. Эксперименты проводились на модернизированной установке УВН-71, оснащенной плоским магнетроном с мишенью, изготовленной из ванадия (99.95 %), диаметром 115 мм. Пленки осаждали на подложки из сапфира R-среза в смеси газов при суммарном давлении 1.3 Па, постоянной плотности тока разряда 69 мА/см² и температуре подложки 600 °С.

Для определения параметров осаждения пленок VO₂ применялся метод оптической эмиссионной спектроскопии. Использовался спектрометр ISM3600, оптическая часть которого построена по схеме полихроматора с приемником излучения на основе прибора с зарядовой связью. Прибор предназначен для регистрации оптических спектров в диапазоне 250...1000 нм со спектральным разрешением в видимой части спектра не более 2.5 нм и имеет абсолютную ошибку измерения длины волны в видимой части спектра не более ±0.5 нм. Вывод оптического сигнала, генерируемого плазмой, из вакуумной камеры выполнен с помощью кварцевого моноволокна диаметром 0.4 мм. Обработка спектров проводилась в про-

граммной среде Aspect. Метод оптической эмиссионной спектроскопии позволяет по спектру испускания разряда определить элементный и ионный составы плазмы разряда и исследовать физические процессы и явления, происходящие при осаждении пленки, что значительно облегчает выбор основных параметров технологического цикла.

В таблице представлены выбранные для исследования эмиссионные линии газового разряда максимальной интенсивности, обладающие наибольшей информативностью. Римскими цифрами после названия элемента обозначена степень ионизации.

Эмиссионные линии элементов
Emission lines of elements

Линия	VI	VI	OI	ArI
Длина волны, нм	318.4	411.2	777.1	811.5

При снятии зависимостей напряжения от расхода реактивного газа и спектров испускания газового разряда в качестве независимых переменных была выбрана плотность тока разряда, составлявшая 69 мА/см^2 (напряжение на разряде при этом составило 425 В). Расход кислорода варьировался в пределах $0 \dots 4.5 \text{ см}^3/\text{мин}$.

Задачей проведенной серии экспериментов являлось определение границ режимов работы ванадиевой мишени при распылении в кислородосодержащей среде. Некоторые характерные результаты серии представлены на рис. 1. При фиксированной плотности тока на мишени были определены зависимости интенсивности линий аргона, кислорода и ванадия от расхода реактивного газа. Согласно результатам, полученным с помощью оптической эмиссионной спектроскопии, можно заключить, что поведе-

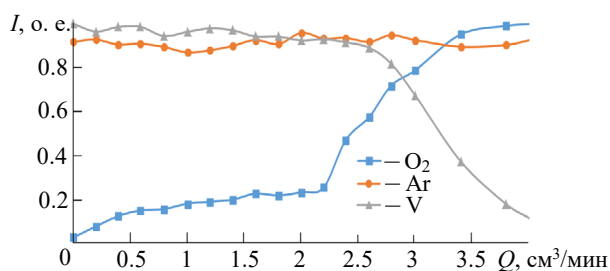


Рис. 1. Интенсивность спектральных линий

Fig. 1. Intensity of spectral lines

ние газового разряда при реактивном магнетронном распылении ванадия аналогично поведению при распылении других металлов переходной группы. Четко определяются границы режимов работы мишени: металлический, переходный и оксидный.

Процессы, происходящие в газовом разряде при реализации металлического режима, проявляются в диапазоне расхода реактивного газа $0 \dots 2.25 \text{ см}^3/\text{мин}$ для фиксированной плотности тока 69 мА/см^2 . При этом интенсивность линии металла в спектре не изменяется, а на поверхности подложки формируется металлическая пленка ванадия. Оксидный режим характеризуется практически полным исчезновением линии металла и выходом в максимальное насыщение линии кислорода. Характерной точкой перехода работы мишени в оксидный режим является расход кислорода $3.5 \text{ см}^3/\text{мин}$. По данным рентгенофазового анализа на поверхности подложки формируется пленка V_2O_5 . Наибольший практический интерес для синтеза пленок диоксида ванадия представляет переходный режим работы мишени при расходе кислорода $2.25 < Q < 3.5 \text{ см}^3/\text{мин}$. В промежуточном состоянии интенсивность линии VI стремительно снижается, а OI – продолжает возрастать.

Типичная рентгенограмма образцов пленок, осажденных в переходном режиме при плотности тока 69 мА/см^2 , расходе кислорода $2.75 \text{ см}^3/\text{мин}$ на подложку, изготовленную из сапфира R-среза, представлена на рис 2, а. В образце присутствует моноклинная фаза оксида ванадия VO_2 с ориентацией относительно плоскости (110) в области $2\theta = 28^\circ$. Как показано на рис. 2, б, дальнейшее увеличение массового расхода кислорода приводит к изменению преимущественной ориентации и формированию в пленке орторомбических фаз V_4O_9 и V_8O на фоне следов тетрагональной фазы VO_2 (021).

Для полученных экспериментально образцов тонких пленок диоксида ванадия измерялась удельная проводимость в зависимости от температуры. Измерения сопротивления проводились с помощью четырехзондового метода в условиях термостатирования образцов диоксида ванадия. Термостатирование обеспечивалось с помощью

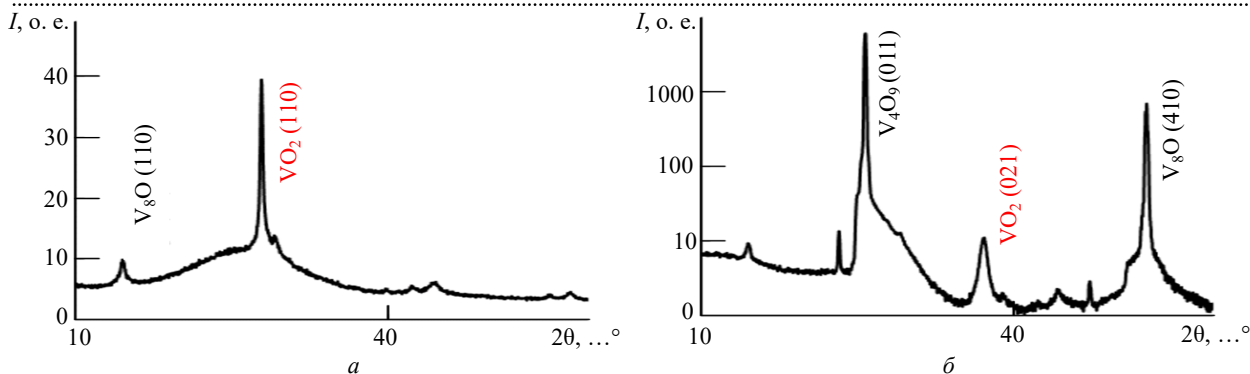


Рис. 2. Рентгенограммы образцов, изготовленных при расходе кислорода: а – 2.75 см³/мин; б – 3.5 см³/мин

Fig. 2. X-ray patterns of samples prepared at an oxygen consumption of: а – 2.75 cm³/min; б – 3.5 cm³/min

элементов Пельтье размерами 40 × 40 мм, температурного датчика РТ100 и программной реализации ПИД-регулятора. Колебания температуры после установления целевого значения не превышали ±0.1 К. Полученные зависимости представлены на рис. 3. Изготовленные образцы демонстрируют перестройку удельной проводимости более трех порядков при ширине гистерезиса ~4 К.

Моделирование. Для исследования процесса формирования токопроводящего канала в тонкой пленке диоксида ванадия было использовано компьютерное моделирование на основе метода конечных элементов (МКЭ) в программном пакете Comsol Multiphysics. Для моделирования структуры использовался мультифизический модуль Electromagnetic Heating (электромагнитный нагрев), в состав которого входили 2 физических модуля – Electric Currents (электрические токи) и Heat Transfer in Solids (телоперенос в твердых телах). Геометрия модели представлена на рис. 4. Модель для исследования процесса формирования токопроводящего

канала представляет собой пленку диоксида ванадия, нанесенную на подложку сапфира. Для подачи напряжения на пленке диоксида ванадия расположены металлические электроды (Cu) в форме треугольников со скругленной вершиной.

Скругление вершины металлического контакта в направлении формируемого канала необходимо для улучшения сходимости решения, получаемого в результате формирования расчетной сетки для МКЭ. В случае треугольной топологии электродов (без скругления вершины) острый угол вершины электрода в процессе формирования расчетной сетки приведет к неоправданно высокому значению напряженности электрического поля (в пределе стремящемуся к бесконечности) в окрестности данной вершины. Известно, что в процессе фотолитографии перенос рисунка топологии осуществляется с некоторой погрешностью, определяемой рядом факторов: разрешающей способностью и точностью оборудования, а также разрешающей способностью переноса рисунка

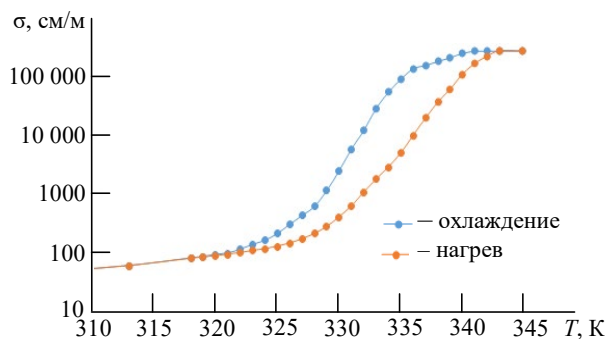


Рис. 3. Температурный гистерезис удельной проводимости экспериментальных образцов тонких пленок диоксида ванадия

Fig. 3. Thermal hysteresis of conductivity of experimental samples of thin vanadium dioxide films

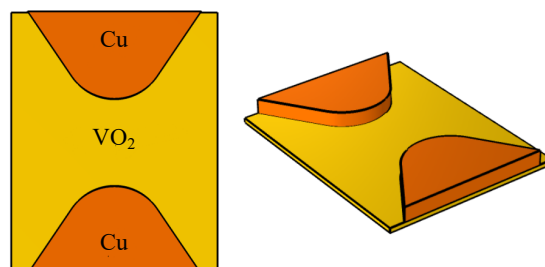


Рис. 4. Вид компьютерной модели для исследования процесса формирования токопроводящего канала в тонкой пленке диоксида ванадия

Fig. 4. A computer model for studying the formation of a conductive channel in a thin vanadium dioxide film

топологии при изготовлении фотошаблона. Таким образом, при изготовлении экспериментальных образцов вершины треугольных металлических электродов будут иметь скругление, радиус которого определяется топологией и выполнен в пределах точности оборудования либо определен пределом точности изготовления фотошаблонов. В рамках данного моделирования радиус скругления вершины треугольного электрода составлял 3 мкм, толщина электродов – 100 нм, а пленки диоксида ванадия – 200 нм. Материал и толщина подложки не учитывались, так как в процессе моделирования на нижней границе пленки диоксида ванадия задавалось условие термостатирования.

Длина формируемого токопроводящего канала, определяемая как наименьшее расстояние между ближайшими точками скругленных встречно-направленных вершин треугольных электродов, являлась переменной величиной, принимая значения из ряда: 5, 10, 20 мкм. При приложении разности потенциалов к электродам по пленке диоксида ванадия протекал ток, который разогревал диоксид ванадия до температуры фазового перехода. Таким образом, в данной статье учтен только джоулев нагрев структуры без учета влияния инжекции электронов из металлических электродов.

Результаты. Чтобы снизить электрическую мощность, необходимую для переключения состояния пленки VO_2 , целесообразным является термостатирование пленки (устройства на ее основе). Стоит заметить, что выбор точки термостатирования зависит от применения устройства и необходимости оптимизации энергопотребления, обуславливающего как фазовый переход пленки, так и собственно термостатирование. При температуре 320 К значения удельной проводимости ($\sim 100 \text{ См/м}$) различаются менее чем на 5 %, что может быть обусловлено погрешностью измерительного прибора. Дальнейшее моделирование проводилось в условиях термостатирования при данной температуре.

Экспериментально полученные зависимости удельной проводимости были использованы при моделировании процесса формирования токопроводящего канала. На рис. 5 представлены вольт-амперные характеристики, полученные в

результате моделирования нагрева и охлаждения элементов с различной длиной токопроводящего канала (5, 10, 20 мкм). Видно, что с ростом длины токопроводящего канала происходит увеличение порогового значения напряжения. Полученные значения пороговых напряжений составляют 23, 42 и 73 В при длинах токопроводящего канала 5, 10, 20 мкм соответственно, при пороговом токе 1.21 мА (точки 1–3 на рис. 5). Таким образом, использование экспериментально полученной температурной характеристики фазового перехода тонких пленок диоксида ванадия позволяет моделировать более сложные структуры на основе данных пленок.

Для оценки быстродействия элемента было проведено моделирование отклика на прямоугольный импульс тока амплитудой 1.4 мА и длительностью $\sim 50 \text{ нс}$. Результаты показали, что время образования токопроводящего канала составляет: $\sim 25 \text{ нс}$ при длине канала 5 мкм; $\sim 32 \text{ нс}$ при 10 мкм; 43 нс при 20 мкм. Так как фазовый переход пленки диоксида ванадия осуществляется за счет нагрева под действием тока, то время образования канала определяется количеством энергии, необходимым для нагрева пленки до температуры фазового перехода. Увеличение длины канала означает увеличение объема пленки, которую необходимо нагреть, что приводит к росту времени образования канала при неизменной амплитуде импульса тока. Время разрушения канала составляет $\sim 2 \text{ нс}$ независимо от длины канала, так как определяется, в основном, эффективностью теплоотвода от пленки диоксида ванадия.

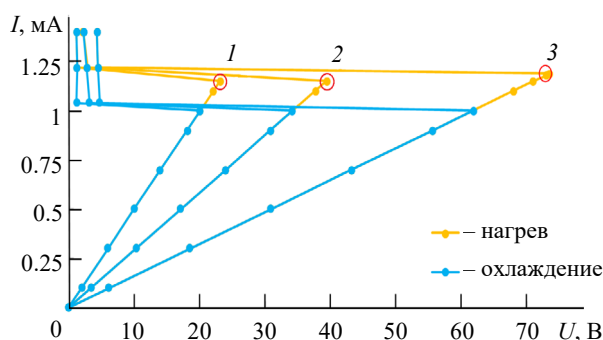


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика фазового перехода при различном расстоянии между электродами, полученная в результате моделирования

Fig. 5. Simulated current-voltage characteristic of the phase transition at different distances between the electrodes

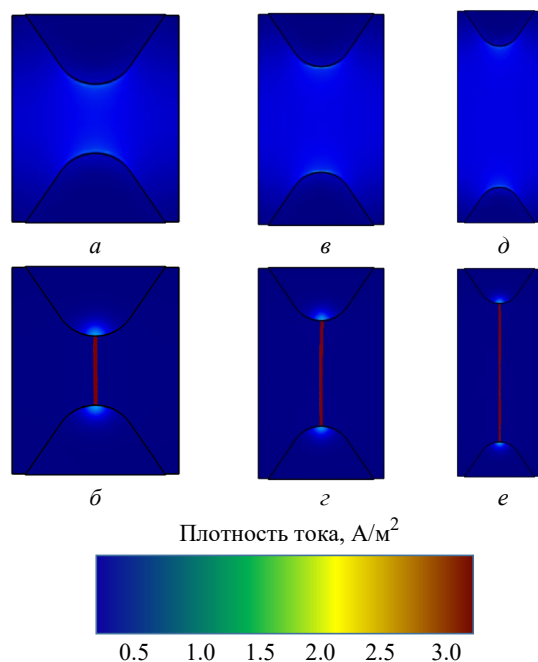


Рис. 6. Результаты моделирования процесса формирования токопроводящего канала при различном расстоянии между электродами: а, б – 5 мкм; в, г – 10 мкм; д, е – 20 мкм

Fig. 6. Simulation results of the formation of a conductive channel at different distances between the electrodes: а, б – 5 μm ; в, г – 10 μm ; д, е – 20 μm

На рис. 6 представлено распределение плотности тока по поверхности пленки при различном расстоянии между электродами. Можно заметить, что до фазового перехода (рис. 6, а, в, д) максимумы плотности тока наблюдаются в области контакта металлических электродов и пленки диоксида ванадия, по остальной поверхности ток распределен почти равномерно. При фазовом переходе (рис. 6, б, г, е) наблюдается формирование ярко выраженного токопроводящего канала с отчетливыми границами. Локальность образованного токопроводящего канала также заметна на распределении температуры по поверхности пленки (рис. 7).

Выводы. Показано, что численные эксперименты на основе компьютерного моделирования позволяют получить основные характеристики СВЧ-переключателя на базе тонких пленок диоксида ванадия. Рассмотрена планарная двухэлектродная конструкция переключателя, управляемого напряжением. Компьютерное моделирование фазового перехода и образования токопроводящего канала СВЧ-переключателя основано на экспериментально по-

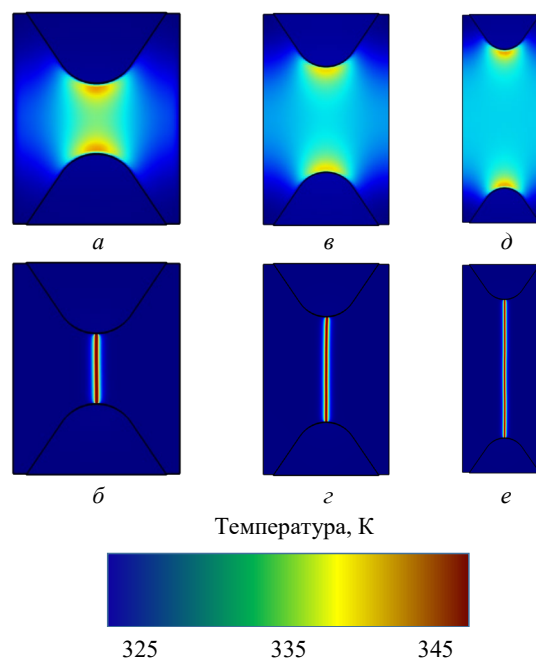


Рис. 7. Распределение температуры при формировании токопроводящего канала при различном расстоянии между электродами: а, б – 5 мкм; в, г – 10 мкм; д, е – 20 мкм

Fig. 7. Temperature distribution during the formation of a conductive channel at different distances between the electrodes: а, б – 5 μm ; в, г – 10 μm ; д, е – 20 μm

лученной температурной зависимости проводимости образцов диоксида ванадия. В результате моделирования была определена оптимальная температура термостатирования (323 K). Установлены значения порогового тока и напряжения на электродах ключа, при превышении которого образуется высокотемпературный токопроводящий канал. В зависимости от расстояния между управляющими электродами значения порогового напряжения составили 23, 42 и 73 В при длинах токопроводящего канала 5, 10, 20 мкм соответственно. Также получены вольт-амперные характеристики при различной длине токопроводящего канала. Результаты моделирования показали, что вольт-амперные характеристики имеют S-образный вид с выраженным гистерезисом. При этом время образования токопроводящего канала составило: ~25 нс при длине канала 5 мкм; ~32 нс при 10 мкм; 43 нс при 20 мкм. Исследование процесса формирования токопроводящего канала является первым шагом при проектировании управляемых СВЧ-элементов на основе тонких пленок диоксида ванадия.

Авторский вклад

Неустров Илья Дмитриевич – изготовление экспериментальных образцов материала, компьютерное моделирование, написание текста статьи.

Легкова Татьяна Константиновна – обработка экспериментальных данных, компьютерное моделирование.

Цымбалюк Андрей Александрович – сборка и наладка оборудования для проведения температурных измерений, экспериментальное исследование пленок диоксида ванадия.

Комлев Андрей Евгеньевич – общее руководство исследованием, постановка задач, изготовление экспериментальных образцов материала, редактирование текста статьи.

Author's contribution

Ilya D. Neustroev, fabrication of experimental samples of the material, computer simulation, writing the text of the article.

Tatyana K. Legkova, processing of experimental data, computer simulation.

Andrey A. Tsymbalyuk, assembly and adjustment of equipment for temperature measurements, experimental study of vanadium dioxide films.

Andrey E. Komlev, general management of the study, setting tasks, making experimental samples of the material, editing the text of the article.

Список литературы

1. Al-Falahy N., Alani O. Y. Technologies for 5G Networks: Challenges and Opportunities // IT Professional. 2017. Vol. 19, № 1. P. 12–20. doi: 10.1109/MITP.2017.9
2. Solutions for urban traffic issues by ITS technologies / H. Makino, K. Tamada, K. Sakai, Sh. Kamijo // IATSS Research. 2018. Vol. 42, № 2. P. 49–60. doi: 10.1016/j.iatssr.2018.05.003
3. Hansen C. J. WiGiG: Multi-gigabit wireless communications in the 60 GHz band // IEEE Wireless Communications. 2011. Vol. 18, № 6. P. 6–7. doi: 10.1109/MWC.2011.6108325
4. A perspective on terahertz next-generation wireless communications / J. F. O'Hara, S. Ekin, W. Choi, I. Song // Technologies. 2019. Vol. 7, № 2. P. 43. doi: 10.3390/technologies7020043
5. Saad W., Bennis M., Chen M. A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies and Open Research Problems // IEEE Network. 2019. Vol. 34, № 3. P. 134–142.
6. Larson L. RF and microwave hardware challenges for future radio spectrum access // Proc. of the IEEE. 2014. Vol. 102, № 3. P. 321–333. doi: 10.1109/JPROC.2014.2298231
7. Kumar P., Pai M. M. M., Ali T. Ultrawideband antenna in wireless communication: A review and current state of the art // Telecommunications and Radio Engineering. 2020. Vol. 79, № 11. P. 929–942. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i11.20
8. Скакунов Р. С., Сорокин К. Н., Кудрявцева Ю. А. Обзор стандартов беспроводной связи и перспектив их развития // Технологии. Инновации. Связь. 2022. С. 267–271.
9. Монолитный СВЧ МЭМ переключатель до 25 ГГц / И. В. Кунилич, В. А. Кагадей, Д. Бобошко, Н. Д. Малютин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. Вып. 1, ч. 1. С. 19–20.
10. Reconfigurable Antennas: Switching Techniques – A survey / N. O. Parchin, H. J. Basherlou, Y. A. A. Al-Yasir, A. M. Abdulkhaleq, R. A. Abd-Alhameed // Electronics. 2020. Vol. 9, № 2. P. 336. doi: 10.3390/electronics9020336
11. Recent progress in the design of 4G/5G reconfigurable filters / Y. I. Al-Yasir, N. O. Parchin, R. Abd-Alhameed, A. M. Abdulkhaleq // Electronics. 2019. Vol. 8, № 1. P. 17. doi: 10.3390/electronics8010114
12. Meng F., Ma K., Yeo K. S. Microwave and Millimeter-Wave Switches // Low-Power Wireless Communication Circuits and Systems. New York: Jenny Stanford Publishing, 2018. P. 205–222.
13. Гримм Дж., Дмитриев С. КМОП-ключи от псс Electronics бросают вызов ключам на основе GaAs // Компоненты и технологии. 2006. № 54. С. 22–23.
14. RF MEMS switches, switching networks and phase shifters for microwave to millimeter wave applications / S. Dey, Sh. K. Koul, A. Poddar, U. L. Rohde // ISSS J. of Micro and Smart Systems. 2020. Vol. 9, № 11. P. 33–47. doi: 10.1007/s41683-020-00051-4
15. Tian W., Li P., Yuan L. X. Research and analysis of MEMS switches in different frequency bands // Micromachines. 2018. Vol. 9, № 4. P. 185. doi: 10.3390/mi9040185
16. Уваров И. В., Куприянов А. Н. Исследование характеристик МЭМС-переключателя электростатического типа с механизмом активного замыкания // Микроэлектроника. 2018. Т. 47, № 5. С. 30–37.
17. Ramsey J., Henderson K., Ghalichechian N. Thermally Actuated Vanadium Dioxide Millimeter Wave Reflectarray // 16th European Conf. on Antennas and Propagation, Madrid, Spain, 1 March – 1 April 2022. IEEE, 2022. P. 1–3. doi: 10.23919/EuCAP53622.2022.9768925

18. Vanadium dioxide for reconfigurable antennas and microwave devices: Enabling RF reconfigurability through smart materials / D. E. Anagnostou, D. Torres, T. S. Teeslink, N. Sepulveda // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2020. Vol. 62, № 3. P. 58–73. doi: 10.1109/MAP.2020.2964521

19. High quality vanadium dioxide films prepared by an inorganic sol-gel method / D. Yin, N. Xu, J. Zhang, X. Zheng // Materials Research Bulletin. 1996. Vol. 31, № 3. P. 335–340.

Информация об авторах

Неустроев Илья Дмитриевич – магистрант 2-го года Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – технология материалов электронной техники, свойства нелинейных 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: neustroev.ilay@gmail.com

Легкова Татьяна Константиновна – аспирантка 2-го года кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – СВЧ-электроника, антенны, свойства нелинейных 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: legkova_tk@mail.ru

Цымбалюк Андрей Александрович – аспирант 2-го года кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – технология материалов электронной техники, свойства нелинейных 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: tsymbalyuk.andrej@yandex.ru

Комлев Андрей Евгеньевич – кандидат технических наук (2011), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – технология материалов электронной техники, плазма. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: aekomlev@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1017-5587>

References

1. Al-Falahy N., Alani O. Y. Technologies for 5G Networks: Challenges and Opportunities. IT Professional. 2017, vol. 19, no. 1, pp. 12–20. doi: 10.1109/MITP.2017.9

2. Makino H., Tamada K., Sakai K., Kamijo Sh. Solutions for Urban Traffic Issues by ITS Technologies. IATSS Research. 2018, vol. 42, no. 2, p. 49–60. doi: 10.1016/j.iatssr.2018.05.003

3. Hansen C. J. WiGiG: Multi-gigabit Wireless Communications in the 60 GHz Band. IEEE Wireless Communications. 2011, vol. 18, no. 6, pp. 6–7. doi: 10.1109/MWC.2011.6108325

4. O'Hara J. F., Ekin S., Choi W., Song I. A Perspective on Terahertz Next-Generation Wireless Communications. Technologies. 2019, vol. 7, no. 2, p. 43. doi: 10.3390/technologies7020043

5. Saad W., Bennis M., Chen M. A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies and Open Research Problems. IEEE Network. 2019, vol. 34, no. 3, pp. 134–142.

6. Larson L. RF and Microwave Hardware Challenges for Future Radio Spectrum Access. Proc. of the IEEE. 2014, vol. 102, no. 3, pp. 321–333. doi: 10.1109/JPROC.2014.2298231

7. Kumar P., Pai M. M., Ali T. Ultrawideband Antenna in Wireless Communication: A Review and Current State of the Art. Telecommunications and Radio Engineering. 2020, vol. 79, no. 11, pp. 929–942. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i11.20

8. Skakunov R. S., Sorokin K. N., Kudryavtseva Yu. A. Overview of Wireless Communication Standards and Prospects for Their Development. Technologies. Innovation. Connection. 2022, pp. 267–271. (In Russ.)

9. Kunilich I. V., Kagadei V. A., Boboshko D., Mal'yutin N. D. Monolithic Microwave MEM Switch up to 25 GHz. Microwave Engineering and Telecommunication Technologies. 2020, iss. 1, pt. 1, pp. 19–20. (In Russ.)

10. Parchin N. O., Basherlou H. J., Al-Yasir Y. A. A., Abdulkhaleq A. M., Abd-Alhameed R. A. Reconfigura-

ble Antennas: Switching Techniques – A survey. Electronics. 2020, vol. 9, no. 2, p. 336. doi: 10.3390/electronics9020336

11. Al-Yasir Y. I., Parchin N. O., Abd-Alhameed R., Abdulkhaleq A. M. Recent Progress in the Design of 4G/5G Reconfigurable Filters. Electronics. 2019, vol. 8, no. 1, p. 17. doi: 10.3390/electronics8010114

12. Meng F., Ma K., Yeo K. S. Microwave and Millimeter-Wave Switches. Low-Power Wireless Communication Circuits and Systems. New York, Jenny Stanford Publishing, 2018, pp. 205–222.

13. Grimm J., Dmitriev S. CMOS Dongles from NEC Electronics Challenge GaAs-Based Dongles. *Komponenty i Tekhnologii* [Components and Technologies]. 2006, no. 54, pp. 22–23. (In Russ.)

14. Dey S., Koul Sh. K., Poddar A., Rohde U. L. RF MEMS switches, Switching Networks and Phase Shifters for Microwave to Millimeter Wave Applications. ISSS J. of Micro and Smart Systems. 2020, vol. 9, no. 11, pp. 33–47. doi: 10.1007/s41683-020-00051-4

15. Tian W., Li P., Yuan L. X. Research and Analysis of MEMS Switches in Different Frequency Bands.

Micromachines. 2018, vol. 9, no. 4, p. 185. doi: 10.3390/mi9040185

16. Uvarov I. V., Kupriyanov A. N. Investigation of the Characteristics of an Electrostatic-Type Mems Switch with an Active Opening Mechanism. Microelectronics. 2018, vol. 47, no. 5, pp. 30–37. (In Russ.)

17. Ramsey J., Henderson K., Ghalichechian N. Thermally Actuated Vanadium Dioxide Millimeter Wave Reflectarray. 16th European Conf. on Antennas and Propagation, Madrid, Spain, 1 March – 1 April 2022. IEEE, 2022, pp. 1–3. doi: 10.23919/EuCAP53622.2022.9768925

18. Anagnostou D. E., Torres D., Teeslink T. S., Sepulveda N. Vanadium Dioxide for Reconfigurable Antennas and Microwave Devices: Enabling RF Reconfigurability through Smart Materials. IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2020, vol. 62, no. 3, pp. 58–73. doi: 10.1109/MAP.2020.2964521

19. Yin D., Xu N., Zhang J., Zheng X. High Quality Vanadium Dioxide Films Prepared by an Inorganic Sol-Gel Method. Materials Research Bulletin. 1996, vol. 31, no. 3, pp. 335–340.

Information about the authors

Ilya D. Neustroev, student of the 2nd year of master of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 1 scientific publication. Area of expertise: technology of electronic materials, properties of non-linear materials. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: neustroev.ilya@gmail.com

Tatyana K. Legkova, Postgraduate Student of Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 2 scientific publications. Area of expertise: microwave electronics; antennas, properties of nonlinear materials. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: legkova_tk@mail.ru

Andrey A. Tsymbalyuk, Postgraduate Student of Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 2 scientific publications. Area of expertise: technology of electronic materials, properties of non-linear materials. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: tsymbalyuk.andrej@yandex.ru

Andrey E. Komlev, Cand. Sci. (Eng.) (2011), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: technology of electronic equipment materials, plasma. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: aekomlev@etu.ru <https://orcid.org/0000-0003-1017-5587>

Создание кольцевой антенной решетки на основе излучателей Вивальди для широкополосного канала связи с ретрансляцией

П. А. Межевов✉, К. О. Коровин, А. Н. Ликонцев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

✉mezhevov.pav@mail.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) находят все более широкое применение. Одной из задач развития БПЛА является создание активных антенных систем с возможностью установки узкого луча главного лепестка диаграммы направленности (ДН). Несмотря на то, что во многих исследованиях рассматривается создание специализированных антенных решеток с широким диапазоном углов сканирования, особенности расположения таких систем на БПЛА не изучались подробно. После разработки таких решеток для БПЛА возможно создание цепи ретрансляции с защищенным широкополосным каналом.

Цель работы. Разработка широкополосной антенной системы для БПЛА с возможностью установки главного лепестка ДН в любом направлении азимутальной плоскости для использования в задачах ретрансляции.

Материалы и методы. В рамках исследования разработана модель излучателя и кольцевой антенной решетки на его основе в пакете электромагнитного моделирования Ansys HFSS.

Результаты. Показаны частотные зависимости коэффициента направленного действия (КНД) и коэффициента усиления (КУ) для кольцевой антенной решетки, состоящей из 8 и 16 элементов, а также частотные зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению и ДН, удовлетворяющие условиям ретрансляции в широкой полосе частот с использованием БПЛА. Представлены рекомендации по количеству активных элементов кольцевой решетки для обеспечения максимума КУ (КНД).

Заключение. Предложены конструктивные решения для использования антенных систем на БПЛА. В дальнейшем система может быть улучшена за счет оптимизации элементов антенной решетки и использования цилиндрической или полусферической решетки.

Ключевые слова: БПЛА, кольцевая антенная решетка, антенна Вивальди, ретрансляция, широкополосный канал связи

Для цитирования: Межевов П. А., Коровин К. О., Ликонцев А. Н. Создание кольцевой антенной решетки на основе излучателей Вивальди для широкополосного канала связи с ретрансляцией // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 3. С. 58–66. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-58-66

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 17.03.2023; принята к публикации после рецензирования 11.05.2023; опубликована онлайн 29.06.2023

Creation of a Vivaldi-Based Circular Antenna Array for Broadband Relay Channels

Pavel A. Mezhevov✉, Konstantin O. Korovin, Aleksey N. Likontsev

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University
of Telecommunications, St Petersburg, Russia

✉mezhevov.pav@mail.ru

Abstract

Introduction. Unmanned aerial vehicles (UAVs) are rapidly gaining in popularity. The UAV development requires active antenna systems capable of forming a narrow beam of the main lobe of the radiation pattern. Although numerous studies have considered specialized antenna arrays with a wide range of scanning angles, the location of such systems on UAVs remains under-investigated. The development of such arrays for UAVs will enable the creation of a secure relay broadband channel with a few repeaters.

Aim. Development of a broadband antenna array for UAVs with the possibility of setting the main lobe of the radiation pattern in any direction of the azimuthal plane, for use in relay tasks.

Materials and methods. An emitter model and a circular antenna array on its basis was developed in the Ansys HFSS electromagnetic modeling package.

Results. The dependence of the directional coefficient and the gain for an array consisting of 8 and 16 elements was shown. Voltage standing-wave ratio dependences and directivity patterns that satisfy the conditions of retransmission in a wide-frequency band using UAVs were obtained. Recommendations on the number of active elements in a circular antenna array that ensure the maximum gain (directivity) were formulated.

Conclusion. Technical solutions that can be used in the development of UAVs are proposed. The system can be further improved by optimizing the antenna array elements and using a cylindrical or hemispherical array.

Keywords: UAV, circular antenna array, Vivaldi antenna, relay, broadband communication channel

For citation: Mezhevov P. A., Korovin K. O., Likontsev A. N. Creation of a Vivaldi-Based Circular Antenna Array for Broadband Relay Channels. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 3, pp. 58–66. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-58-66

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

Submitted 17.03.2023; accepted 11.05.2023; published online 29.06.2023

Введение. В настоящее время область беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) активно развивается, что требует создания каналов в связи с растущими возможностями. Ввиду роста возможностей оптики и телевизионных матриц требуется увеличение пропускной способности канала, а следовательно – и рабочей полосы системы. При этом системы малого радиуса действия могут работать в пределах прямой видимости, а для систем средней и большей дальности требуется использование спутникового канала либо ретранслятора. В настоящее время возможности использования спутников ограничены, в связи с чем особый интерес вызывает возможность ретрансляции сигнала.

В связи с особенностями распространения радиоволн существует ограничение на даль-

ность работы радиоканала, что делает неизбежным применение ретрансляторов для каналов большой дальности.

Исследования каналов на БПЛА с ретрансляцией описаны в [1–3], однако конкретные антенные системы для таких систем не рассматриваются.

Существующие антенны и антенные системы для БПЛА в основном являются ненаправленными и обладают малым коэффициентом усиления [4].

Исследования, посвященные кольцевой антенной решетке (КАР) для БПЛА, в основном нацелены на работу антенной системы в нескольких диапазонах частот при обеспечении круговой диаграммы направленности (ДН) [5].

Целью данной статьи является разработка широкополосной антенной системы для БПЛА с возможностью установки главного лепестка ДН в любом направлении азимутальной плоскости для использования в задачах ретрансляции. Для достижения данной цели в ходе исследования были поставлены задачи выбора антенной системы и ее дальнейшего проектирования с учетом использования в качестве бортовой антенной системы БПЛА.

Выбор бортовой антенной системы. На текущий момент все больше систем связи используют БПЛА в различных целях [6, 7]. Обеспечение необходимого уровня помехоустойчивости, а также создание легких и малогабаритных антенн становится актуальной задачей. БПЛА являются подвижными объектами с переменным во времени положением в пространстве, поэтому необходимо использовать либо ненаправленные антенны, либо антенны с возможностью изменения ДН вплоть до изменения направления главного лепестка на 180° в обе стороны. Ненаправленные антенны обладают низким коэффициентом усиления (КУ), что приводит к значительному уменьшению дальности связи с наземной станцией и сокращению зоны обслуживания БПЛА.

В отличие от ненаправленных антенн антенные системы, позволяющие изменять ДН, повышают помехоустойчивость канала за счет пространственной селекции помех, т. е. за счет установки нулей ДН антенной системы [8]. Помехоустойчивость канала также можно повысить, расширяя спектр сигнала, например с помощью системы псевдослучайной перестройки рабочей частоты. Однако для приме-

нения методов расширения спектра требуются широкополосные антенны.

В итоге для бортовой антенной системы можно установить следующие требования:

- возможность работы в любом направлении;
- возможность установки нулей в ДН;
- широкополосность.

Для указанных требований выбор бортовой системы очевиден – это антенная решетка (АР). Для изменения частоты работы бортовая антенная система должна состоять из широкополосных антенн либо из нескольких антенн разных диапазонов. Для бортовой системы предпочтительны широкополосные антенны, так как это позволяет уменьшить массогабаритные параметры антенной системы [9].

Геометрия и расположение АР на БПЛА могут различаться. Например, можно расположить несколько линейных АР в крыльях БПЛА (рис. 1, а). Это позволяет успешно синтезировать ДН с произвольным положением максимума вдоль направления движения БПЛА. Однако такое расположение излучателей обладает серьезным недостатком – невозможностью формирования ДН в направлении поперек движения БПЛА. Предпочтительным вариантом расположения антенной системы на БПЛА является использование КАР (рис. 1, б). В этом случае КУ будет меньше КУ линейной решетки с одинаковым количеством излучателей, при этом появляется возможность синтеза максимума ДН для произвольного угла азимутальной плоскости [10]. Такую антенную систему целесообразно устанавливать в нижней полусфере БПЛА, чтобы уменьшить влияние фюзеляжа на характеристики КАР [11].

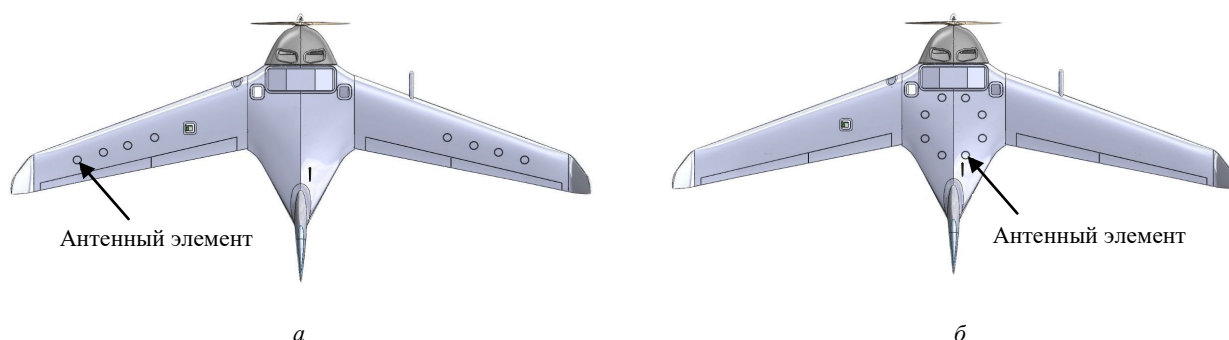


Рис. 1. Расположение излучателей АР на БПЛА: а – линейная АР в крыльях; б – КАР под корпусом

Fig. 1. Location of the AA emitters on the UAV: а – linear AA in the wings; б – circular AA under the body

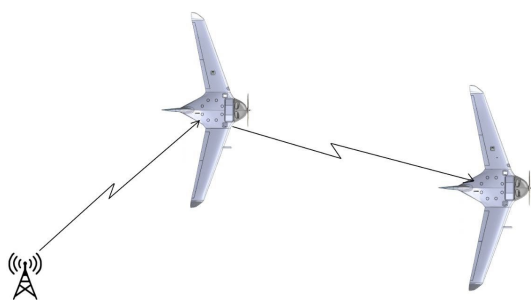


Рис. 2. Принцип ретрансляции сигнала с использованием КАР
Fig. 2. Principle of signal retransmission using a circular antenna array

В данной статье предлагается использовать КАР, что позволит устанавливать максимумы и нули ДН для произвольных углов азимутальной плоскости при решении задачи устранения и внесистемных помех. Одним из важных преимуществ КАР является возможность одновременного формирования максимумов ДН, разнесенных по азимуту на углы, большие 90° , что позволяет использовать БПЛА в качестве ретранслятора (рис. 2).

Выбор излучателя КАР. Основными требованиями, предъявляемыми к излучателю КАР, являются широкополосность, компактность и направленность. Для соблюдения требований к антенной системе БПЛА и повышения помехоустойчивости методами расширения спектра может быть выбрана антенна Вивальди, так как она обладает относительно небольшими размерами и является широкополосной, с возможностью расширения полосы до разряда сверхширокополосных [12].

КУ излучателя Вивальди обычно находится в диапазоне 5...10 дБ [13], ширина основного лепестка ДН – в пределах $30...50^\circ$. Это свидетельствует о пригодности антенны Вивальди для создания АР на ее основе.

Существуют различные формы раскрыва антенны Вивальди (рис. 3), которые непосредственно влияют на такие выходные параметры, как ДН и волновое сопротивление. В [14] описываются методы питания и приводятся выходные параметры для разных конструктивных вариантов антенны Вивальди, возбуждаемых с помощью интегрированного в подложку волновода.

В данной статье выбрана классическая антенна Вивальди с экспоненциальным раскры-

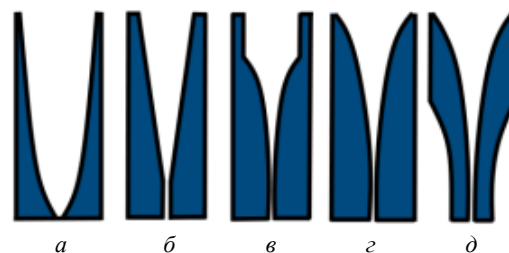


Рис. 3. Основные формы раскрыва антенны Вивальди:
а – параболический; б – линейный; в – Ферми;
г – экспоненциальный; д – двухэкспоненциальный

Fig. 3. The main forms of Vivaldi antenna aperture:
а – parabolic; б – linear; в – Fermi; г – exponential;
д – two-exponential

вом, так как такой раскрыв показывает наилучшие характеристики согласования с питающей линией, т. е. обладает наибольшей полосой рабочих частот.

Существует большое количество разнообразных способов питания антенн Вивальди. В [13] рассмотрены основные виды подключения микрополосковой линии (МПЛ). Для проектирования излучателя КАР было выбрано подключение с помощью прямоугольной МПЛ.

Проектирование излучателя и КАР. В качестве материала проводника излучателя и МПЛ была выбрана медь, а в качестве диэлектрика – стеклотекстолит FR4. Выбор материалов обусловлен широким использованием при создании различного радиотехнического оборудования [15].

При проектировании было решено отказаться от кольцевого резонатора в конструкции излучателя для уменьшения длины излучателя. При таком методе запитки излучающей щели антенна остается согласованной на меньший диапазон частот. В зависимости от требований к бортовой антенной системе в конструкцию можно вносить изменения для повышения рабочей полосы частот.

Разъемы SMA, использующиеся для питания всех элементов КАР, были вынесены вниз для дальнейшего размещения в нижней части корпуса антенной системы.

Излучатель, построенный в Ansys HFSS, представлен на рис. 4, а. Выходными параметрами для излучателя являются ДН (рис. 4, б) и допустимые частоты использования. На рис. 5 приводится полученная частотная зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению

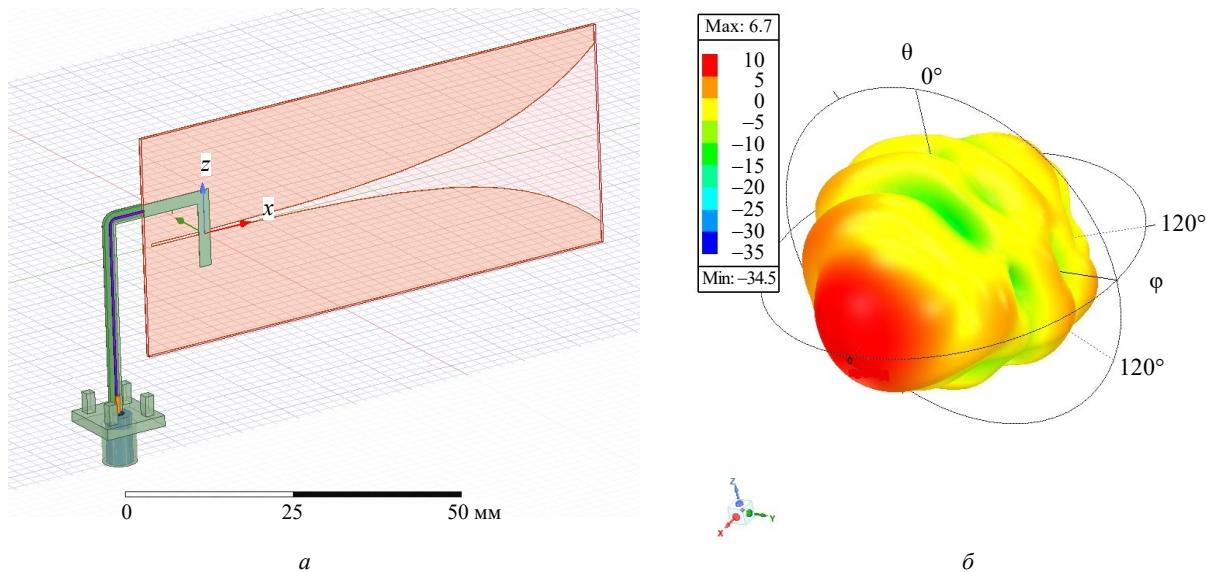


Рис. 4. Излучатель Вивальди: а – с питанием; б – его ДН

Fig. 4. Vivaldi emitter: a – with power supply; б – its radiation pattern

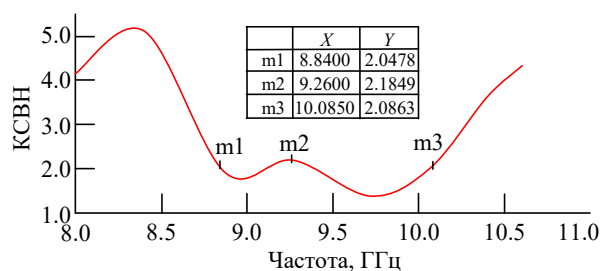


Рис. 5. КСВН излучателя Вивальди

Fig. 5. VSWR of the Vivaldi emitter

(КСВН). Маркерами m1, m3 обозначены границы полосы пропускания антенны; m2 – локальный максимум КСВН.

Для одиночного элемента Вивальди получены следующие результаты моделирования:

- ширина ДН в азимутальной плоскости – 44°;

- КУ в направлении максимума – 6.7 дБи;
- рабочая полоса частот – от 8.8 до 10.1 ГГц;
- уровень боковых лепестков – -7 дБ.

Итоговой задачей проектирования становится создание КАР из излучателей Вивальди с возможностью изменения частоты работы и ДН для получения главного лепестка излучения в любом азимутальном положении.

На основе данного излучателя были спроектированы КАР из 8 и 16 элементов. Для максимизации КУ АР было принято решение о частичной запитке излучателей. Для 8-элементной АР 3 соседних активных излучателя являются оптимальным выбором. При необходимости перестройки ДН необходимо изменять выбор трех соседних элементов, что сокращает требования к максимальному пово-

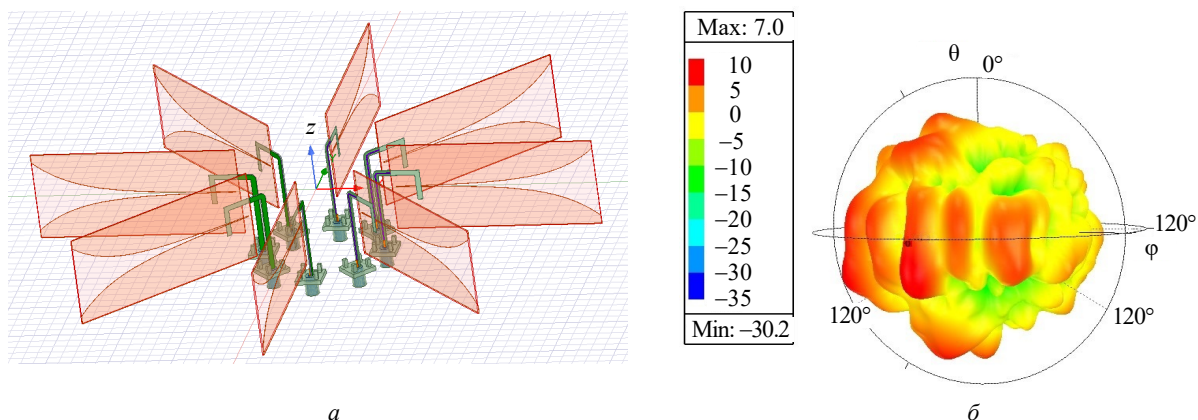


Рис. 6. КАР из 8 элементов (а) и ее ДН (б)

Fig. 6. Circular antenna array of 8 elements (a) and its radiation pattern (б)

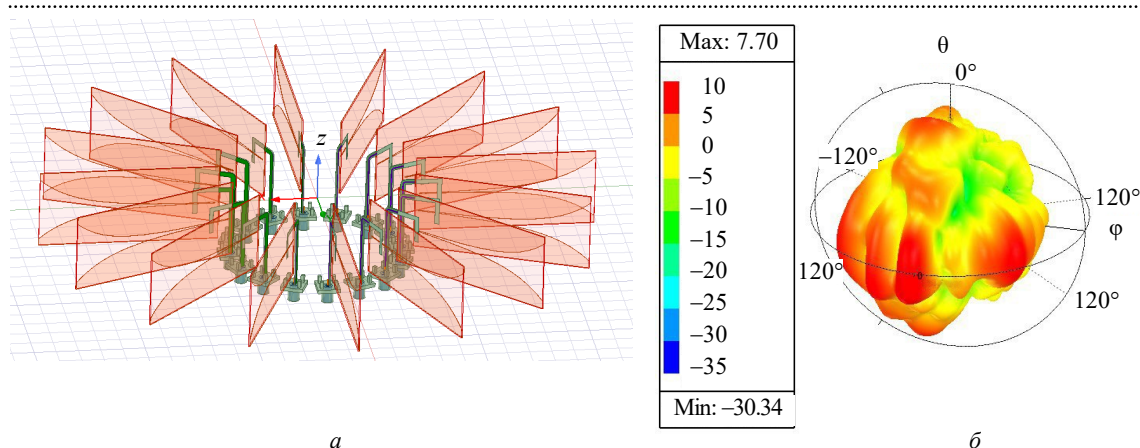


Рис. 7. КАР из 16 элементов (а) и ее ДН (б)

Fig. 7. Circular antenna array of 16 elements (a) and its radiation pattern (b)

роту главного лепестка ДН до 22.5° . При использовании 16 элементов оптимальным будет выбор четырех или пяти излучателей, а требования к повороту уменьшаются еще сильнее – до 12.25° . Внешний вид КАР из 8 и 16 элементов показан на рис. 6, а и 7, а соответственно, а их ДН на рис. 6, б и 7, б.

Было произведено моделирование ДН КАР при разном количестве активных элементов M (8 и 3 элемента для 8-элементной КАР; 16, 5 и 3 элемента для 16-элементной КАР). В ходе моделирования изменялся радиус кольца и определялся максимум КУ антенной системы. Результаты приведены в таблице. Они показывают, что наилучшие показатели направленности антенны приобретают при использовании трех активных соседних элементов, что обу-

словлено наибольшим вкладом в ДН решетки соседних элементов. Предложенный в данной статье способ питания элементов КАР не позволяет уменьшить радиус кольца ниже 0.83λ для 8-элементной решетки и 1.31λ для 16-элементной решетки.

Зависимости КСВН от частоты для 8- и 16-элементной КАР представлены на рис. 8, 9 соответственно. Маркеры m1–m4 показывают границы полосы пропускания и локальные максимумы КСВН.

Как видно из графиков КСВН, 16-элементная КАР обладает меньшей полосой вследствие взаимного влияния элементов, но при этом имеет больший КУ.

Сценарии ретрансляции с помощью БПЛА подразумевают ситуации, когда угол между

Параметры кольцевой антенной решетки из антенн Вивальди для колец из 8 и 16 элементов

Parameters of an circular array of Vivaldi antennas for rings of 8 and 16 elements

Количество элементов (N)	Радиус кольца (R), λ	Количество активных элементов (M)	Частота (F), ГГц	Параметры направленности в направлении главного максимума (КНД/КУ), дБ
8	0.83	8	10	7.00/4.60
8	0.83	3	10	9.10/6.60
8	1	8	10	8.61/5.98
8	1	3	10	9.70/7.00
8	1.16	8	10	7.63/5.02
8	1.16	3	10	8.70/6.20
16	1.31	16	10	8.50/6.00
16	1.31	5	10	9.40/6.90
16	1.31	3	10	10.38/7.70
16	1.48	16	10	7.20/4.90
16	1.48	5	10	9.03/6.54
16	1.48	3	10	10.07/8.10
16	1.65	16	10	6.58/4.21
16	1.65	5	10	8.80/6.30
16	1.65	3	10	10.10/7.40

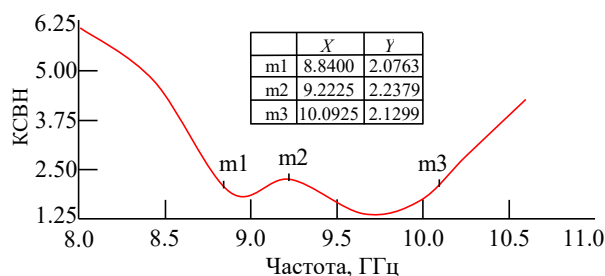


Рис. 8. КСВН КАР из 8 элементов Вивальди

Fig. 8. VSWR of circular antenna array of 8 Vivaldi elements

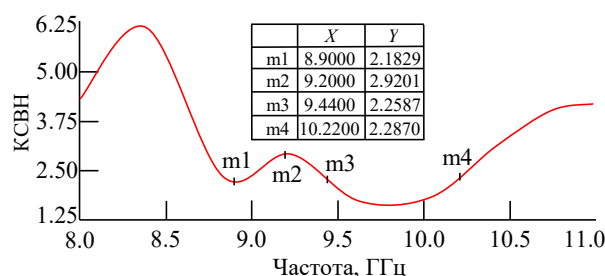


Рис. 9. КСВН КАР из 16 элементов Вивальди

Fig. 9. VSWR of circular antenna array of 16 Vivaldi elements

направлениями на источник и на корреспондента составляет 90° или больше (см. рис. 2), что позволяет использовать 3 элемента со стороны приема и 3 со стороны передачи, обеспечивая необходимую форму ДН. Для обеспечения ретрансляции в режиме полного дуплекса необходимо выставить 2 максимума ДН в направлении приема и ретрансляции. Использование КАР позволяет это сделать за счет большего количества активных элементов, но одновременно снижает КУ антенной системы на 3 дБ.

Использование системы обработки сигналов на борту БПЛА позволит обеспечить полудуплексный режим работы антенной системы, сохранив тем самым высокие показатели направленности.

Закключение. В статье приводится 2 варианта реализации бортовой антенной системы БПЛА – КАР с 8 и 16 элементами Вивальди. Использование КАР позволяет синтезировать ДН с необходимым направлением главного максимума излучения. Элемент Вивальди обеспечивает широкую рабочую полосу частот, что может быть использовано для повышения помехоустойчивости методами расширения спектра. В статье исследованы зависимости КУ и КНД от радиуса КАР, показано, что наилучшие показатели в настоящей работе достигаются при радиусе λ для 8-элементной системы и 1.31λ для 16-элементной системы. Также предложен вариант питания только 3–5 соседних излучателей для максимизации КУ в направлении главного максимума.

В дальнейшем может потребоваться доработка с точки зрения способа питания антенн для улучшения характеристик согласования с питающей линией и возможностью еще большего расширения рабочей полосы частот. Кроме того, следует учесть расположение АР на БПЛА и влияние борта на выходные параметры антенной системы. Также возможен вариант использования других разновидностей антенн Вивальди.

Для полноценной работы предложенной системы требуется создать диаграммообразующее устройство с возможностью реализации требуемого амплитудно-фазового распределения на любых трех соседних элементах.

Дальнейшим продолжением работы по созданию антенной системы с управляемым главным максимумом будет создание системы с возможностью управления лучом не только в азимутальной плоскости, но и в угломестной.

Список литературы

1. Channel modeling and performance analysis for UAV relay system / X. Chen, X. Hu, Q. Zhu, W. Zhong, B. Chen // China Communications. 2018. Vol. 15, № 12. P. 89–97. doi: 10.12676/j.cc.2018.12.007
2. Development and Testing of a Two-UAV Communication Relay System / B. Li, Y. Jiang, J. Sun, L. Cai, C.-Y. Wen // Sensors. 2016. Vol. 16, iss. 10. P. 1696. doi: 10.3390/s16101696
3. Outage Performance of Multi-Antenna Mobile UAV-Assisted NOMA Relay Systems Over Nakagami Fading Channels / T. M. Hoang, B. C. Nguyen,

- L. T. Dung, T. Kim // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 215033–215043. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3041311
4. Low-Profile Conformal UWB Antenna for UAV Applications / L. I. Balderas, A. Reyna, M. A. Panduro, C. Del Rio, A. R. Gutiérrez // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 127486–127494. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2939511
5. Dudarev S. V., Voytovich N. I., Dudarev A. V. Annular antenna array with a circular radiation pattern in the plane of vector E // American Institute of Physics. Conf. Ser. 2022. Vol. 2467, № 1. doi: 10.1063/5.0092572

6. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве / Ю. Н. Зубарев, Д. С. Фомин, А. Н. Чащин, М. В. Заболотнова // Вестн. Пермского федерального исследовательского центра. 2019. № 2. С. 47–51. doi: 10.7242/2658-705X/2019.2.5

7. Nex F., Remondino F. UAV for 3D mapping applications: a review // *Applied Geomatics*. 2014. № 6. P. 1–15. doi: 10.1007/s12518-013-0120-x

8. Нечаев Ю. Б., Зотов С. А., Макаров Е. С. Сверхразрешающие алгоритмы в задаче азимутальной радиопеленгации с использованием кольцевых антенных решеток // *Антенны*. 2007. № 7. С. 29–34.

9. Коровин К. О., Кузьмин С. В. Реализация канала связи с БПЛА с использованием широкополосных малоэлементных антенных решеток в качестве бортовых антенных систем // *Тр. учебных заведений связи*. 2020. Т. 6, № 2. С. 39–44. doi: 10.31854/1813-324X-2020-6-2-39-44

10. Uniform circular arrays for phased array antenna / N. H. Noordin, V. Zuniga, A. O. El-Rayis, N. Haridas, A. T. Erdogan, T. Arslan // *Loughborough Antennas & Propagation Conf. Loughborough, UK, 14–15 Nov. 2011. Piscataway: IEEE, 2011. P. 1–4. doi: 10.1109/LAPC.2011.6114031*

11. Низкопрофильная антенна для БПЛА / А. С. Антонов, Ю. Г. Антонов, С. В. Балландович, М. И. Сугак // *Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ"*. 2013. № 6. С. 3–7.

12. Борзов А. Б., Лихоеденко К. П., Серегин Г. М. Принципы построения сверхширокополосной антенны Вивальди для импульсных приемопередающих модулей систем ближней радиолокации и радиосвязи // *Спецтехника и связь*. 2013. № 6. С. 54–57.

13. Compact UWB Vivaldi Tapered Slot Antenna / S. Saleh, W. Ismail, I. S. Z. Abidin, M. H. Jamaluddin, M. H. Bataineh, A. S. Alzoubi // *Alexandria Engineering J.* 2022. Vol. 61, № 6. P. 4977–4994. doi: 10.1016/j.aej.2021.09.055

14. Демшевский В. В., Цитович А. А., Папёнышев М. В. Антенна Вивальди на основе интегрированного в подложку волновода для сверхширокополосных автомобильных локаторов К-диапазона частот // *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. 2019. Т. 1, № 1. С. 151–155.

15. The microwave and RF characteristics of FR4 substrates / J. R. Aguilar, M. Beadle, P. T. Thompson, M. W. Shelley // *IEE Colloquium on Low Cost Antenna Technology*. London, UK: IEEE, 1998. P. 2/1–2/6. doi: 10.1049/ic:19980078

Информация об авторах

Межевов Павел Александрович – аспирант и ассистент кафедры радиосистем и обработки сигналов Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Автор четырех научных работ. Сфера научных интересов – антенны; СВЧ-устройства. Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, пр. Большевиков, д. 22/1, Санкт-Петербург, 193232, Россия. E-mail: mezhevov.pav@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9797-2575>

Коровин Константин Олегович – кандидат физико-математических наук (2009), доцент (2020), заведующий кафедрой радиосистем и обработки сигналов Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – антенны, антенные решетки; СВЧ-устройства. Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, пр. Большевиков, д. 22/1, Санкт-Петербург, 193232, Россия. E-mail: konstkor@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7979-3725>

Ликонцев Алексей Николаевич – кандидат физико-математических наук (1990), доцент кафедры радиосистем и обработки сигналов Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Автор 60 научных работ. Сфера научных интересов – спутниковые и радиорелейные системы; спутниковое и кабельное телевидение. Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, пр. Большевиков, д. 22/1, Санкт-Петербург, 193232, Россия. E-mail: likontsev-rt@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0009-5562-2142>

References

1. Chen X., Hu X., Zhu Q., Zhong W., Chen B. Channel Modeling and Performance Analysis for UAV Relay System. *China Communications*. 2018, vol. 15, no. 12, pp. 89–97. doi: 10.12676/j.cc.2018.12.007

2. Li B., Jiang Y., Sun J., Cai L., Wen C.-Y. Development and Testing of a Two-UAV Communication

Relay System. *Sensors*. 2016, vol. 16, iss. 10, p. 1696. doi: 10.3390/s16101696

3. Hoang T. M., Nguyen B. C., Dung L. T., Kim T. Outage Performance of Multi-Antenna Mobile UAV-Assisted NOMA Relay Systems Over Nakagami Fading Channels. *IEEE Access*. 2020, vol. 8, pp. 215033–

Создание кольцевой антенной решетки на основе излучателей Вивальди

для широкополосного канала связи с ретрансляцией

Creation of a Vivaldi-Based Circular Antenna Array for Broadband Relay Channels

215043. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3041311

4. Balderas L. I., Reyna A., Panduro M. A., Del Rio C., Gutiérrez A. R. Low-Profile Conformal UWB Antenna for UAV Applications. IEEE Access. 2019, vol. 7, pp. 127486–127494. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2939511

5. Dudarev S. V., Voytovich, N. I., Dudarev, A. V. Annular Antenna Array with a Circular Radiation Pattern in the Plane of Vector E. American Institute of Physics. Conf. Ser. 2022, vol. 2467, no. 1. doi: 10.1063/5.0092572

6. Zubarev Yu. N., Fomin D. S., Chashchin A. N., Zabolotnova M. V. Use of Uncleaned Aircraft in Agriculture. Perm Federal Research Center J. 2019, no. 2, pp. 47–51. doi: 10.7242/2658-705X/2019.2.5 (In Russ.)

7. Nex F., Remondino F. UAV for 3D Mapping Applications: A Review. Applied Geomatics. 2014, no. 6, pp. 1–15. doi: 10.1007/s12518-013-0120-x

8. Nechaev Yu. B., Zotov S. A., Makarov E. S. Super-Resolution Algorithms in the Problem of Azimuthal Radio Bearing with Using Ring Antenna Arrays. *Antenny [Antennas]*. 2007, no. 7, pp. 29–34. (In Russ.)

9. Korovin K. O., Kuzmin S. V. Implementation of UAV Communication Channel Using Airborne Wide-Band Low-Element Antenna Arrays. Proc. of Telecommunication Universities. 2020, vol. 6, no. 2, pp. 39–44. doi: 10.31854/1813-324X-2020-6-2-39-44 (In Russ.)

10. Noordin N. H., Zuniga V., El-Rayis A. O., Haridas N., Erdogan A. T., Arslan T. Uniform Circular

Arrays for Phased Array Antenna. Loughborough Antennas & Propagation Conf. Loughborough, UK, 14–15 Nov. 2011. Piscataway, IEEE, 2011, pp. 1–4. doi: 10.1109/LAPC.2011.6114031

11. Antonov A. S., Antonov Yu. G., Ballandovich S. V., Sugak M. I. Low-Profile Antenna Intended for the Installation on UAV. Proc. of Saint Petersburg Electrotechnical University. 2013, no. 6, pp. 3–7. (In Russ.)

12. Borzov A. B., Lihodenko K. P., Seregin G. M. Principles of Construction of Ultra-Wideband Vivaldi Antenna for Pulsed Transmitter and Transmitter Modules of Near Radar and Radio Communication Systems. *Spectehnika i svjaz'*. 2013, no. 6, pp. 54–57. (In Russ.)

13. Saleh S., Ismail W., Abidin I. S. Z., Jamaluddin M. H., Bataineh M. H., Alzoubi A. S. Compact UWB Vivaldi Tapered Slot Antenna. Alexandria Engineering J. 2022, vol. 61, no. 6, pp. 4977–4994. doi: 10.1016/j.aej.2021.09.055

14. Demshevskii V. V., Tsitovich A. A., Papjonyshv M. V. Vivaldi Antenna Based on a Waveguide Integrated into the Substrate for Ultra-Wideband Automotive K-band Locators. Electronics and Microelectronics Microwave. 2019, vol. 1, no. 1, pp. 151–155. (In Russ.)

15. Aguilar J. R., Beadle M., Thompson P. T., Shelley M. W. The Microwave and RF Characteristics of FR4 Substrates. IEE Colloquium on Low Cost Antenna Technology. London, UK, IEEE, 1998, pp. 2/1–2/6. doi: 10.1049/ic:19980078

Information about the author

Pavel A. Mezhevov, Postgraduate Student and Assistant of the Department of Radio Systems and Signal Processing of The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications. The author of 4 scientific publications. Area of expertise: antennas; microwave devices.

Address: The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, 22/1, Bolshhevikov Pr., St Petersburg 193232, Russia

E-mail: mezhevov.pav@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9797-2575>

Konstantin O. Korovin, Cand. Sci. (Eng.) (2009), Docent (2020), Head of the Department of Radio Systems and Signal Processing of The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: antenna arrays; microwave devices.

Address: The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, 22/1, Bolshhevikov Pr., St Petersburg 193232, Russia

E-mail: konstkor@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7979-3725>

Aleksey N. Likontsev, Cand. Sci. (Eng.) (1990), Associate Professor of the Department of Radio Systems and Signal Processing of The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications. The author of 60 scientific publications. Area of expertise: satellite and radio relay systems; satellite and cable television.

Address: The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, 22/1, Bolshhevikov Pr., St Petersburg 193232, Russia

E-mail: likontsev-rts@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0009-5562-2142>

Моделирование рассеянного шероховатой поверхностью радиосигнала методом стационарных точек

А. А. Монаков✉

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

✉a_monakov@mail.ru

Аннотация

Введение. Во многих задачах радиолокации и радионавигации существует проблема адекватного, т. е. соответствующего физике, явления в определенном диапазоне условий, моделирования радиосигнала, отраженного от шероховатой поверхности Земли. В настоящее время существует 4 категории математических моделей, каждая из которых соответствует определенной группе методов решения задачи рассеяния: методы, основанные на строгом решении электродинамических уравнений (методы конечных элементов, конечных разностей, моментов); приближенные методы решения электродинамических задач (методы малых возмущений и касательной плоскости, двухмасштабная модель); метод статистических эквивалентов; феноменологические модели. В 2 первых категориях электромагнитное поле вычисляется на сетке, шаг которой должен быть значительно меньше длины волны сигнала. Это делает моделирование рассеянного радиосигнала практически нереализуемым для двумерных шероховатых поверхностей. Метод статистических эквивалентов основан на вычислении вероятностных характеристик рассеянного сигнала. Сложности, возникающие при этом, сужают возможности моделирования, поскольку без значительных упрощений невозможно получить замкнутые выражения для требуемых вероятностных характеристик. Кроме того, при аналитических вычислениях приходится ограничиться классом поверхностей с нормальным распределением высот шероховатости. Феноменологические модели позволяют выполнить качественный анализ рассеяния сигнала на шероховатой поверхности, но не учитывают физику процесса рассеяния.

Цель работы. Целью предлагаемой работы является создание простой и адекватной модели рассеянного двумерной шероховатой поверхностью сигнала во временной области в приближении граничных условий по методу касательной плоскости (метод Кирхгофа), которая может быть реализована на современных вычислительных средствах.

Материалы и методы. Созданная модель рассеянного сигнала основана на его представлении в виде суммы сигналов, отраженных от стационарных точек поверхности – точек, для которых локально выполняется закон зеркального отражения падающей электромагнитной волны.

Результаты. Реализация модели сводится к определению положений стационарных точек на двумерной шероховатой поверхности. Эта задача решается на современных компьютерах достаточно просто и не требует использования вычислений с комплексными числами. Оказывается, что количество стационарных точек даже при большой шероховатости поверхности редко оказывается больше двух. Этот факт в сочетании с простотой нахождения координат стационарных точек делает возможным применение модели в длинных сериях статистических испытаний.

Заключение. Предлагаемая модель проста в реализации и может быть использована для исследования точности пеленгаторов, работающих по низколетящим целям, высотометров, корреляционных и доплеровских измерителей скорости и угла сноса.

Ключевые слова: шероховатая поверхность, рассеянный сигнал, метод Кирхгофа, стационарная точка поверхности, моделирование сигнала

Для цитирования: Монаков А. А. Моделирование рассеянного шероховатой поверхностью радиосигнала методом стационарных точек // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 3. С. 67–76. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-67-76

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.12.2022; принята к публикации после рецензирования 22.03.2023; опубликована онлайн 29.06.2023



Simulation of a Radio Signal Scattered from a Rough Surface by the Method of Stationary Points

Andrey A. Monakov✉

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

✉a_monakov@mail.ru

Abstract

Introduction. Many radar and radio navigation problems require adequate (i.e., corresponding to the physics of radio wave scattering under a certain set of conditions) simulation of a radio signal scattered from a rough surface. At present, four categories of mathematical models are used for these purposes, with each corresponding to a particular group of methods for solving the scattering problem. These methods include those based on a rigorous solution of the electrodynamic equations (methods of moments, finite elements, finite differences); approximate methods for solving electrodynamic problems (methods of small perturbations, tangent plane (Kirchhoff method), two-scale model); those of statistical equivalents; and phenomenological models. In the former two categories, the electromagnetic field is computed on a surface grid, whose step must be much smaller than the signal wavelength. This makes the simulation of a scattered radio signal effectively unrealizable for two-dimensional rough surfaces. The method of statistical equivalents is based on the calculation of the probabilistic characteristics of a scattered signal. Difficulties arising in this case narrow the possibilities of simulation, largely due to the impossibility of obtaining closed expressions for the required characteristics without significant simplifications. In addition, carrying out analytical calculations, the solution is restricted to the class of surfaces with the Gaussian distribution of roughness heights. Phenomenological models, although providing for a qualitative analysis of signal scattering from a rough surface, fail to take the physics of the scattering process into account.

Aim. To create a simple and adequate model of a signal scattered from a two-dimensional rough surface using the tangent plane approximation of the boundary conditions (the Kirchhoff method), which can be realized on modern computers.

Materials and methods. The proposed model of the scattered signal is based on its representation as a sum of signals reflected from stationary points on the surface, i.e., those points where the law of specular reflection of the incident electromagnetic wave is locally fulfilled.

Results. The implementation of the model is reduced to determination of the positions of stationary points on a two-dimensional rough surface. This problem is solved on modern computers quite simply without computations with complex numbers. It turns out that the number of stationary points, even with a large surface roughness, rarely exceeds two. This fact, along with the simplicity of finding the coordinates of stationary points, makes this model suitable for long series of statistical runs.

Conclusion. The proposed model is easy to implement and can be used to study the accuracy of low-altitude target estimation, altimeters, Doppler and correlation speed and drift angle estimators.

Keywords: rough surface, scattered signal, Kirchhoff method, stationary surface point, signal simulation

For citation: Monakov A. A. Simulation of a Radio Signal Scattered from a Rough Surface by the Method of Stationary Points. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 3, pp. 67–76. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-67-76

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

Submitted 16.12.2022; accepted 22.03.2023; published online 29.06.2023

Введение. Рассеяние радиоволн на шероховатых поверхностях является темой интенсивных исследований [1–6]. Широкий интерес к проблеме объясняется тем, что, во-первых, радиосигналы, отраженные от поверхности Земли, используются для определения параметров движения

воздушных судов в автономных бортовых радиосистемах – радиовысотомерах, доплеровских и корреляционных измерителях скорости и угла сноса [7, 8], и, во-вторых, эти сигналы являются помехами для многих радиолокационных и радионавигационных систем наблюдения целей, дви-

жущихся или находящихся на малых высотах над поверхностью [9, 10].

Синтез и анализ алгоритмов обнаружения и оценки пространственных координат целей в присутствии сигналов от поверхности требует создания их адекватных математических моделей. Однако, несмотря на большое количество методов решения задачи рассеяния радиоволн на шероховатых поверхностях и появление мощных компьютеров, создание математической модели рассеянного шероховатой поверхностью сигнала по-прежнему является сложной задачей. В настоящее время существует 4 категории математических моделей, каждая из которых соответствует определенной группе методов решения задачи рассеяния: модели, основанные на численном решении строгих электродинамических уравнений [11–13]; приближенные электродинамические модели [2, 6, 14]; модели, использующие метод статистических эквивалентов [15–19]; феноменологические модели [20–24]. Каждой из перечисленных категорий присущи свои достоинства и недостатки.

Численное решение электродинамических уравнений Максвелла в дифференциальной или интегральной форме дает наиболее точное решение задачи моделирования. Однако при реализации методов этой категории для определения граничных значений поля на поверхности необходимо использовать пространственную сетку, шаг между узлами которой должен составлять доли длины волны. Кроме того, при использовании этого подхода возникает необходимость решать системы линейных уравнений большой размерности. В этих условиях решение задачи о рассеянии радиоволн на двумерной шероховатой поверхности даже для современных компьютеров трудно реализуемо, и исследователям приходится удовлетвориться рассмотрением более простой задачи о рассеянии на одномерной (цилиндрической) шероховатой поверхности. Применение приближенных электродинамических методов (например, методов малых возмущений, касательной плоскости (метод Кирхгофа), двухмасштабной модели) также не решает поставленную задачу, поскольку и в этом случае, несмотря на отсутствие необходимости решать системы линейных уравнений большой раз-

мерности, требуется использовать пространственную сетку с малым шагом для нахождения соответствующих поверхностных интегралов. Метод статистических эквивалентов предполагает аналитическое вычисление вероятностных характеристик рассеянного сигнала – чаще всего его математического ожидания и корреляционной функции в предположении нормальности распределения вероятностей, с последующим моделированием случайного сигнала с полученными вероятностными характеристиками. Без применения значительных упрощающих приближений решить эту задачу даже в простейших случаях оказывается очень сложно, поскольку получающиеся решения представляют собой медленно сходящиеся ряды. Наиболее простые для реализации феноменологические модели дают верное качественное представление о характеристиках рассеянного сигнала, но не учитывают реальные механизмы рассеяния радиоволн и поэтому не гарантируют адекватное моделирование. Из всех перечисленных методов приближенного решения задачи метод Кирхгофа позволяет не только создать простую и физически близкую к реальности модель рассеяния, но и определить характеристики рассеянного сигнала в широком диапазоне изменений среднеквадратической высоты и радиуса корреляции поверхности.

Целью предлагаемой статьи является создание простой и адекватной модели рассеянного двумерной шероховатой поверхностью сигнала во временной области в приближении граничных условий по методу касательной плоскости (метод Кирхгофа), которая может быть реализована на современных вычислительных средствах. Решение задачи моделирования основано на представлении рассеянного сигнала суммой отражений от стационарных точек поверхности – точек, где локально выполняется закон зеркального отражения. Благодаря этому удастся значительно сократить количество необходимых вычислений.

Моделирование рассеянного сигнала методом Кирхгофа. Пусть шероховатая, двумерная, идеально проводящая, в среднем плоская поверхность, уравнение которой можно записать в виде $z = \xi(x, y)$, где $\xi(x, y)$ – случайная функция с нулевым математическим ожи-

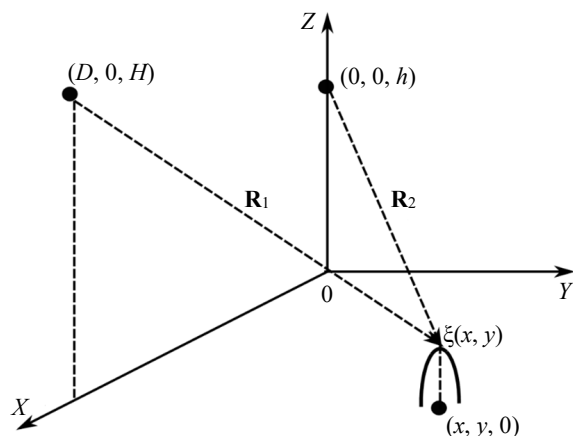


Рис. 1. Геометрия задачи

Fig. 1. Geometry of the problem

данием, облучается монохроматической сферической волной частоты ω от точечного источника, расположенного на высоте H в точке с координатами $(D, 0, H)$ (рис. 1). Все вычисления будем проводить в системе координат приемника XYZ . Начало системы координат 0 находится в подрадарной точке – точке, находящейся на плоскости $z = 0$ строго под точкой расположения фазового центра антенны приемника, а ось X направим вдоль поверхности в направлении на источник сигнала. Точка приема, где находится фазовый центр антенны приемника, имеет координаты $(0, 0, h)$.

Тогда отраженный от поверхности сигнал в точке приема, в соответствии с расчетом рассеянного шероховатой поверхностью электромагнитного поля методом Кирхгофа [2], равен

$$e(t) = \frac{\pi k C}{i(2\pi)^3} \int_S \frac{\exp[-ik(R_1 + R_2)]}{R_1 R_2} dS, \quad (1)$$

где $e(t)$ – комплексная амплитуда сигнала, отраженного от поверхности в точке приема; $k = \omega/c$ – волновое число (c – скорость распространения электромагнитных волн в вакууме); C – постоянная, которая зависит от амплитуды падающей на поверхность сферической волны и может быть определена на основе известного решения задачи отражения электромагнитной волны от плоской проводящей поверхности (см. (4)); $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица; S – горизонтальная плоскость XOY ;

$$\begin{cases} R_1 = \sqrt{(D-x)^2 + y^2 + (H - \xi(x, y))^2}; \\ R_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (h - \xi(x, y))^2} \end{cases}$$

– длины векторов $R_{1,2}$ (D – горизонтальная дальность между точками излучения и приема сигнала). Указанная в (1) зависимость принимаемого сигнала $e(t)$ от времени предполагает, что длины векторов R_1 и R_2 могут изменяться на интервале наблюдения (моделирования), например, вследствие движения источника, приемника или самой поверхности.

Уравнение (1) является исходным для статистического анализа принятого сигнала. Допустим, что длина волны λ , на которой излучается сигнал, настолько мала, что $kR_{1,2} \gg 1$. Исходя из этого предположения, проинтегрируем (1) по переменным x и y методом стационарной фазы [25]. Несложно показать, что координаты j -й точки стационарности (x_j, y_j) функции $\varphi(x, y) = (R_1 + R_2)$ совместно должны удовлетворять системе уравнений:

$$\begin{cases} \xi'_x(x_j, y_j) = \frac{-DR_2 + x_j(R_1 + R_2)}{(hR_1 + HR_2) - \xi(x_j, y_j)(R_1 + R_2)}; \\ \xi'_y(x_j, y_j) = \frac{y_j(R_1 + R_2)}{(hR_1 + HR_2) - \xi(x_j, y_j)(R_1 + R_2)}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\xi'_x(x, y) = \frac{\partial}{\partial x} \xi(x, y)$ и $\xi'_y(x, y) = \frac{\partial}{\partial y} \xi(x, y)$ –

первые частные производные функции $\xi(x, y)$.

Тогда принятый сигнал равен

$$e(t) = \frac{C}{8\pi i} \sum_j \frac{\exp[-ik(R_{1j} + R_{2j})]}{R_{1j} R_{2j} \sqrt{|\varphi''(x_j, y_j)|}} \times \exp\left[-i\frac{\pi}{4} \text{sgn } \varphi''(x_j, y_j)\right], \quad (3)$$

где $R_{1j} = R_1(x_j, y_j)$ и $R_{2j} = R_2(x_j, y_j)$ – значения R_1 и R_2 в j -й стационарной точке; $|\varphi''(x_j, y_j)|$ – детерминант гессиана (матрицы

вторых производных) функции $\varphi(x, y)$; $\text{sgn } \varphi''(x_j, y_j) = (v_+ - v_-)$; v_+ и v_- – соответственно, число положительных и отрицательных собственных значений гессиана [25]. Найти элементы гессиана в общем случае не сложно, однако получающиеся формулы громоздки и поэтому здесь не приводятся.

В случае плоской поверхности, когда $\xi(x, y) = 0$, получим

$$e_0 = -\frac{C}{4\pi R_A \sin \varepsilon_A} e^{-ikR_A}, \quad (4)$$

где $R_A = \sqrt{D^2 + (H+h)^2}$; $\sin \varepsilon_A = (H+h)/R_A$. Таким образом, рассеянный плоской поверхностью сигнал равен сигналу, излучаемому антиподом – зеркальным изображением источника сигнала, который находится под поверхностью на расстоянии H от нее. Кроме того, принимаемый сигнал не зависит от времени. Уравнение (4) имеет ясный физический смысл и может быть использовано для определения постоянной C . Например, если положить, что $e_0 = -\exp[-ikR_A]/(\sqrt{4\pi}R_A)$, т. е. отраженная волна – сферическая и излучается антиподом, то $C = \sqrt{4\pi} \sin \varepsilon_A$.

Окончательно алгоритм моделирования отраженного от поверхности сигнала сводится к решению системы уравнений (2), которая дает положения точек на поверхности, удовлетворяющих условию стационарности фазы падающей на поверхность волны. Решение этого уравнения может быть получено путем задания на поверхности достаточно плотной сетки и определения точек, в окрестности которых происходит одновременное изменение знака функций, равных разностям левых и правых частей уравнений системы (2). После того как стационарные точки определены, сигнал от поверхности вычисляется с использованием уравнения (3).

Вертикальное зондирование шероховатой поверхности. Для проверки модели в работе было проведено математическое моделирование для случая, когда луч антенны радиолокатора направлен вертикально вниз на шеро-

ховатую подстилающую поверхность. Этот случай представляет интерес при моделировании сигналов в радиовысотомерах и корреляционных измерителях скорости и угла сноса.

Несложно показать, что в этом случае $D = 0$,

$$h = H \quad \text{и} \quad R_1 = R_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (h - \xi(x, y))^2}.$$

Поэтому координаты стационарных точек удовлетворяют системе уравнений

$$\begin{cases} \xi'_x(x_j, y_j) = \frac{x_j}{h - \xi}, \\ \xi'_y(x_j, y_j) = \frac{y_j}{h - \xi} \end{cases}$$

и

$$\begin{aligned} |\varphi''(x_j, y_j)| = & \frac{1}{R_j^2} \left\{ 1 + \left(\frac{x_j}{h - \xi} \right)^2 + \left(\frac{y_j}{h - \xi} \right)^2 + (h - \xi)^2 [\xi''_{xx}\xi''_{yy} - (\xi''_{xy})^2] - \right. \\ & - (h - \xi) \left[\xi''_{xx} \left(1 + \left(\frac{y_j}{h - \xi} \right)^2 \right) + \right. \\ & \left. \left. + \xi''_{yy} \left(1 + \left(\frac{x_j}{h - \xi} \right)^2 \right) - 2\xi''_{xy} \frac{x_j y_j}{(h - \xi)^2} \right] \right\}, \end{aligned}$$

где $R_j = \sqrt{x_j^2 + y_j^2 + (h - \xi)^2}$; $\xi = \xi(x_j, y_j)$;

$$\xi''_{xx} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \xi(x_j, y_j); \quad \xi''_{yy} = \frac{\partial^2}{\partial y^2} \xi(x_j, y_j) \quad \text{и}$$

$\xi''_{xy} = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \xi(x_j, y_j)$ – вторые частные производные функции $\xi(x, y)$, вычисленные в точке (x_j, y_j) . Тогда на основании (3) отраженный от поверхности сигнал равен

$$\begin{aligned} e(t) = & \frac{C}{8\pi i} \sum_j \frac{\exp[-i2kR_j]}{R_j^2 \sqrt{|\varphi''(x_j, y_j)|}} \times \\ & \times \exp\left[-i\frac{\pi}{4} \text{sgn } \varphi''(x_j, y_j)\right]. \end{aligned}$$

В случае плоской поверхности отраженная от нее волна является сферической

$$e_0 = -\frac{C}{8\pi h} e^{-i2kh}.$$

Учитывая, что точное решение задачи об отражении сферической волны от плоской, идеально проводящей поверхности равно

$$e_0 = -\frac{e^{-i2kh}}{\sqrt{4\pi}2h}, \text{ постоянная } C = \sqrt{4\pi}.$$

Двухмерная поверхность в работе моделировалась методом дискретного преобразования Фурье

$$\begin{aligned} \xi(m\Delta x, n\Delta y) = & \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} \zeta_{pq} \sqrt{P(p\Delta\omega_x, q\Delta\omega_y) \frac{\Delta\omega_x \Delta\omega_y}{4\pi^2}} \times \\ & \times \exp\left[-i\left(\frac{2\pi}{M}pm + \frac{2\pi}{N}nq\right)\right], \end{aligned}$$

где Δx и Δy – расстояния между узлами сетки на поверхности, в которых вычисляются случайные высоты; m, n, p, q – целочисленные переменные; M и N – количество узлов сетки на поверхности; ζ_{pq} – независимые комплексные гауссовские случайные числа с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией; $P(\omega_x, \omega_y)$ – спектральная плотность мощности шероховатости; $\Delta\omega_x$ и $\Delta\omega_y$ – соответствующие шаги сетки по пространственным частотам. Выбранный способ моделирования поверхности дает возможность использовать быстрое преобразование Фурье для расчета поверхности $\xi(m\Delta x, n\Delta y)$ и ее частных производных, если выбрать $\Delta\omega_x = 2\pi/(M\Delta x)$ и $\Delta\omega_y = 2\pi/(N\Delta y)$:

$$\begin{aligned} \xi'_x(m\Delta x, n\Delta y) = & \text{Im} \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} p\Delta\omega_x \times \\ & \times \zeta_{pq} \sqrt{P(p\Delta\omega_x, q\Delta\omega_y) \frac{\Delta\omega_x \Delta\omega_y}{4\pi^2}} \times \\ & \times \exp\left[-i\left(\frac{2\pi}{M}pm + \frac{2\pi}{N}nq\right)\right]; \\ \xi'_y(m\Delta x, n\Delta y) = & \text{Im} \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} q\Delta\omega_y \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \zeta_{pq} \sqrt{P(p\Delta\omega_x, q\Delta\omega_y) \frac{\Delta\omega_x \Delta\omega_y}{4\pi^2}} \times \\ & \times \exp\left[-i\left(\frac{2\pi}{M}pm + \frac{2\pi}{N}nq\right)\right]; \end{aligned}$$

$$\xi''_{xx}(m\Delta x, n\Delta y) = -\text{Re} \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} (p\Delta\omega_x)^2 \times$$

$$\begin{aligned} & \times \sqrt{P(p\Delta\omega_x, q\Delta\omega_y) \frac{\Delta\omega_x \Delta\omega_y}{4\pi^2}} \times \\ & \times \exp\left[-i\left(\frac{2\pi}{M}pm + \frac{2\pi}{N}nq\right)\right]; \end{aligned}$$

$$\xi''_{xy}(m\Delta x, n\Delta y) = -\text{Re} \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} pq\Delta\omega_x \times$$

$$\begin{aligned} & \times \Delta\omega_y \zeta_{pq} \sqrt{P(p\Delta\omega_x, q\Delta\omega_y) \frac{\Delta\omega_x \Delta\omega_y}{4\pi^2}} \times \\ & \times \exp\left[-i\left(\frac{2\pi}{M}pm + \frac{2\pi}{N}nq\right)\right]; \end{aligned}$$

$$\xi''_{yy}(m\Delta x, n\Delta y) = -\text{Re} \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} (q\Delta\omega_y)^2 \times$$

$$\begin{aligned} & \times pq \sqrt{P(p\Delta\omega_x, q\Delta\omega_y) \frac{\Delta\omega_x \Delta\omega_y}{4\pi^2}} \times \\ & \times \exp\left[-i\left(\frac{2\pi}{M}pm + \frac{2\pi}{N}nq\right)\right]; \end{aligned}$$

$$m = 0, \dots, M-1, n = 0, \dots, N-1.$$

Это значительно ускоряет вычисления. Положения стационарных точек на поверхности при моделировании определяются путем нахождения узлов сетки, где происходит одновременное изменение знака функций:

$$\begin{cases} F_x(m, n) = \xi'_x(m\Delta x, n\Delta y) - \frac{m\Delta x}{h - \xi(m\Delta x, n\Delta y)}; \\ F_y(m, n) = \xi'_y(m\Delta x, n\Delta y) - \frac{n\Delta y}{h - \xi(m\Delta x, n\Delta y)}; \\ m = 0, \dots, M-1; n = 0, \dots, N-1. \end{cases}$$

При этом возможны ситуации, когда фиксация изменения знака у функций $F_x(m, n)$ и $F_y(m, n)$ происходит в соседних узлах сетки. Такие ситуации должны быть исключены путем следующей проверки. Пусть одновремен-

ное изменение знака функций $F_x(m, n)$ и $F_y(m, n)$ обнаружено в узлах (m_1, n_1) и (m_2, n_2) . Тогда, если выполняется условие

$$\max(|m_1 - m_2|, |n_1 - n_2|) \leq 1,$$

узел (m_1, n_1) исключается из множества возможных решений. Полученное таким прореживанием множество и есть множество стационарных точек.

В статье моделировалась двухмерная шероховатая поверхность, соответствующая размерам зоны, облучаемой антенной радиолокатора при высоте антенны над поверхностью $H = 100$ м. Передатчик и приемник не меняли своего положения относительно поверхности. Сценарные параметры для моделирования были выбраны следующими: длина волны $\lambda = 6.67$ см; ширина диаграммы направленности антенны $\Delta\theta = 20^\circ$; радиус корреляции высот шероховатости поверхности $L = 10$ м; шаг сетки на поверхности $\Delta x = \Delta y = \lambda/4$; количество узлов в сетке $M = N = 2048$; количество статистических испытаний (реализаций случайной поверхности) $J = 1000$. Спектральная плотность мощности шероховатой поверхности была взята равной

$$S(\omega_x, \omega_y) = \pi(\sigma L)^2 \exp\left[-(0.5\omega_x L)^2 - (0.5\omega_y L)^2\right],$$

где σ – среднеквадратическая высота поверхности.

В ходе моделирования при разных значениях среднеквадратической высоты поверхности σ оценивались средние мощности зеркальной $P_{\text{зерк}}$ и диффузной $P_{\text{диф}}$ компонент рассеянного сигнала:

$$\hat{P}_{\text{зерк}} = \left| J^{-1} \sum_{j=1}^J e^{(j)} \right|^2;$$

$$\hat{P}_{\text{диф}} = J^{-1} \sum_{j=1}^J \left(\left| e^{(j)} - J^{-1} \sum_{j=1}^J e^{(j)} \right|^2 \right),$$

где $e^{(j)}$ – значение отраженного сигнала в j -м статистическом испытании. Для $P_{\text{зерк}}$ и $P_{\text{диф}}$ известны аналитические выражения [2]:

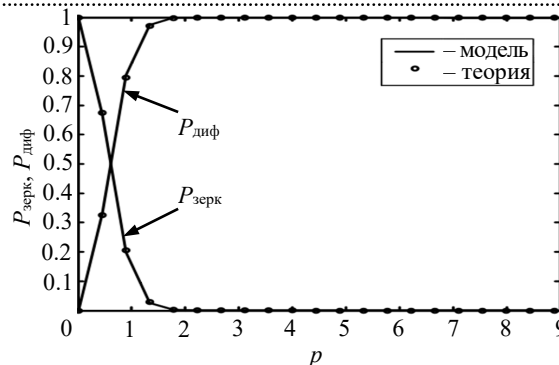


Рис. 2. Результаты моделирования

Fig. 2. Simulation results

$$P_{\text{зерк}} = P_0 \exp[-2p^2];$$

$$P_{\text{диф}} = P_0 (1 - \exp[-2p^2]), \quad (5)$$

где P_0 – мощность сигнала, отраженного от плоской поверхности; $p = \sqrt{2}k\sigma$ – параметр шероховатости. Результаты моделирования приведены на рис. 2. Здесь точкам соответствуют оценки средних мощностей в предлагаемой модели сигнала и сплошные линии – расчетам $P_{\text{зерк}}$ и $P_{\text{диф}}$ по уравнениям (5). Значения мощностей на рисунке нормированы к P_0 .

Как видно из рисунка, экспериментальные и теоретические зависимости совпали с высокой точностью. Предлагаемая модель значительно ускоряет процесс моделирования, поскольку не требует вычисления комплексных экспоненциальных функций для всех узлов сетки на поверхности, количество которых в математическом эксперименте было равно $M \times N = 2^{22}$. Комплексные экспоненты вычисляются только для стационарных точек, число которых зависит от параметров шероховатости s и L . При моделировании фиксировалось количество стационарных точек J для каждого статистического испытания. Оказалось, что даже при $s = \lambda$ ($p = 8.89$) J редко принимает значения больше 2.

Заключение. В статье предложена математическая модель рассеянного двухмерной шероховатой поверхностью сигнала. В отличие от известных моделей рассеянный сигнал представлен суммой отражений от стационарных точек поверхности – точек, где локально выполняется закон зеркального отражения для заданного взаимного расположения приемника

и источника сигнала. Основная проблема при реализации модели состоит в нахождении координат стационарных точек. При заданной реализации шероховатой поверхности эта задача решается достаточно просто путем определения точек, где происходит изменение знака двух функций, нули которых соответствуют положениям точек стационарности фазы падающей на поверхность волны. Математический эксперимент показал, что предлагаемая модель значительно сокращает количество вычислений, поскольку для определения координат стационарных точек используются операции только с действительными числами, а количество стационарных точек даже при больших значениях среднеквадратической высоты по-

верхности редко бывает больше двух. Вместе с тем оценка средних мощностей зеркальной и диффузной компонент рассеянного сигнала с высокой точностью равна значениям этих величин известным из теории. Предлагаемая модель может быть использована для исследования точности пеленгаторов, работающих по низколетящим целям, высотометров, корреляционных и доплеровских измерителей скорости и угла сноса при любом типе распределения вероятностей высот шероховатости при условии, что поверхность дважды непрерывно дифференцируема и выполняются ограничения, лежащие в основе метода Кирхгофа как приближенного метода расчета дифракции электромагнитных волн на шероховатой поверхности.

Список литературы

1. Зубкович С. Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. М.: Сов. радио, 1968. 224 с.
2. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
3. Кулемин Г. П., Рассказовский В. Б. Рассеяние миллиметровых волн поверхностью земли под малыми углами. Киев: Наукова думка, 1987. 232 с.
4. Tsang L., Kong J. A., Ding K.-H. Scattering of Electromagnetic Waves: Theories and Applications. New York: John Wiley & Sons, 2000. Vol. 1. 426 p.
5. Scattering of Electromagnetic Waves: Numerical Simulations / L. Tsang, J. A. Kong, K.-H. Ding, C. O. Ao. New York: John Wiley & Sons, 2001. Vol. 2. 705 p.
6. Tsang L., Kong J. A. Scattering of Electromagnetic Waves: Advance Topics. New York: John Wiley & Sons, 2001. Vol. 3. 413 p.
7. Сосновский А. А., Хаймович И. А. Радиоэлектронное оборудование летательных аппаратов: справ. М.: Транспорт, 1987. 256 с.
8. Авиационная радионавигация: справ. / А. А. Сосновский, А. И. Хаймович, Э. А. Лукин, И. Б. Максимов; под ред. А. А. Сосновского. М.: Транспорт, 1990. 263 с.
9. Островитянов Р. В., Басалов Ф. А. Теория радиолокации протяженных целей. М.: Радио и связь, 1992. 232 с.
10. Монаков А. А., Поваренкин Н. В. Оценка угла места низколетящей цели: синтез алгоритма оценки // Успехи современной радиоэлектроники. 2019. № 11. С. 20–28. doi: 10.18127/j20700784-201911-04
11. Axline R. M., Fung A. K. Numerical computation of scattering from a perfectly conducting random surface // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1978. Vol. AP-26, № 3. P. 482–488. doi: 10.1109/TAP.1978.1141871
12. Oh Y., Sarabandi K. An improved numerical simulation of electromagnetic scattering from perfectly conducting random surfaces // Proc. of IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp. and URSI National Radio Science Meeting. 1994. Vol. 3. P. 2024–2027. doi: 10.1109/APS.1994.408089
13. Леонтьев В. В., Бородин М. А. Усечение падающего поля в задаче рассеяния электромагнитных волн на случайных поверхностях конечной длины // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 48–56. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-48-56
14. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 2: Многократное рассеяние, турбулентность, шероховатые поверхности и дистанционное зондирование. М.: Мир, 1981. 317 с.
15. Монаков А. А., Храмченко Г. Н. Модель радиолокационных сигналов в случае двухмерной шероховатой поверхности // Радиотехника. 1997. № 12. С. 44–48.
16. Monakov A. A., Khrumchenko G. N. Low Altitude Target Model for Radar Simulation // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2002. Vol. 38, № 2. P. 668–675. doi: 10.1109/TAES.2002.1008995
17. Монаков А. А., Поваренкин Н. В. Оценка угла места низколетящей цели: математическая модель сигнала, рассеянного шероховатой поверхностью при скользких углах распространения // Успехи современной радиоэлектроники. 2019. № 11. С. 12–19. doi: 10.18127/j20700784-201911-03
18. Монаков А. А., Нестеров М. Ю. Статистические свойства сигналов радиовысотометра при отражении от шероховатой цилиндрической поверхности // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 12. С. 51–66.

19. Monakov A. A., Nesterov M. Yu. Statistical properties of FMCW radar altimeter signals scattered from a rough cylindrical surface // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2017. Vol. 53, № 1. P. 323–333. doi: 10.1109/TAES.2017.2650498

20. Brown G. S. The average impulse response of a rough surface and its applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1977. Vol. AP-25, № 1. P. 67–74. doi: 10.1109/TAP.1977.1141536

21. Бородин М. А., Михайлов В. Н., Филиппова П. А. Математическая модель доплеровского спектра сигнала, рассеянного морской поверхностью, при скользких углах облучения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 3. С. 63–73. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-63-73

22. Бородин М. А. Моделирование формы эхосигнала радиовысотомера // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 4. С. 52–62. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-4-52-62

23. Аналитическая модель эхосигнала спутникового высотомера / Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. Т. 17, № 3. С. 39–45.

24. Эхосигнал спутникового высотомера с учетом доплеровского рассеяния / Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. Т. 17, № 3. С. 46–51.

25. Федорюк М. В. Асимптотика, интегралы и ряды. М.: Наука, 1987. 544 с.

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. Zubkovich S. G. *Statisticheskie kharakteristiki radiosignalov, otrazhennykh ot zemnoy poverkhnosti* [Statistical Characteristics of Radio Signals Reflected from the Earth's Surface]. Moscow, Sov. Radio, 1968, 224 p. (In Russ.)

2. Bass F. G., Fuks I. M. Wave Scattering from Statistically Rough Surfaces. New York, Pergamon Press, 1979, 527 p.

3. Kulemin G. P., Rasskazovskii V. B. *Rasseyaniye millimetrovyykh voln poverkhnost'yu zemli pod malymi uglami* [Scattering of Millimeter Radio Waves at Small Grazing Angles]. Kiev, Naukova dumka, 1987, 232 p. (In Russ.)

4. Tsang L., Kong J. A., Ding K.-H. Scattering of Electromagnetic Waves: Theories and Applications. Vol. 1. New York, John Wiley & Sons, 2000, 426 p.

5. Tsang L., Kong J. A., Ding K.-H., Ao C. O. Scattering of Electromagnetic Waves: Numerical Simulations. Vol. 2. New York, John Wiley & Sons, 2001, 705 p.

6. Tsang L., Kong J. A. Scattering of Electromagnetic Waves: Advance Topics. Vol. 3. New York, John Wiley & Sons, 2001, 413 p.

7. Sosnovskii A. A., Khaimovich I. A. *Radiotekhnicheskoe oborudovanie letatel'nykh apparatov: sprav.* [Aircraft Radio Equipment Handbook]. Moscow, Transport, 1987, 256 p. (In Russ.)

8. Sosnovskii A. A., Khaimovich A. I., Lutin E. A., Maksimov I. B. *Aviatzionnaya radionavigatsiya* [Air Navigation Aids. Handbook]. Ed. A. A. Sosnovskii.

Moscow, Transport, 1990, 263 p. (In Russ.)

9. Ostrovityanov R. V., Basalov F. A. *Teoriya radiolokatsii protyazhennykh tselei* [Theory of Radar of Extended Targets]. Moscow, Radio i svyaz', 1992, 232 p. (In Russ.)

10. Monakov A. A., Povarenkin N. V. Estimation of the Elevation Angle of the Low-Flying Target: Synthesis of an Estimation Algorithm. J. Achievements of Modern Radioelectronics. 2019, no. 11, pp. 20–28. doi: 10.18127/j20700784-201911-04

11. Axline R. M., Fung A. K. Numerical Computation of Scattering from a Perfectly Conducting Random Surface. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1978, vol. AP-26, no. 3, pp. 482–488. doi: 10.1109/TAP.1978.1141871

12. Oh Y., Sarabandi K. An Improved Numerical Simulation of Electromagnetic Scattering from Perfectly Conducting Random Surfaces. Proc. of IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp. and URSI National Radio Science Meeting. 1994, vol. 3, pp. 2024–2027. doi: 10.1109/APS.1994.408089

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

14. Ishimaru A. Wave Propagation and Scattering in Random Media: Multiple Scattering, Turbulence,

Rough Surfaces, and Remote Sensing. Pt. 2. New York, Academic, 1978, 317 p.

15. Monakov A. A., Khranchenko G. N. Simulation Model of Radar Signals in Case of 2D Rough Surface. Radio Technique. 1997, no. 12, pp. 44–48. (In Russ.)

16. Monakov A. A., Khranchenko G. N. Low Altitude Target Model for Radar Simulation. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2002, vol. 38, no. 2, pp. 668–675. doi: 10.1109/TAES.2002.1008995

17. Monakov A. A., Povarenkin N. V. Estimation of the Elevation Angle of the Low Altitude Target: a Mathematical Model of the Signal Scattered by the Rough Surface at Sliding Propagation Angles. J. Achievements of Modern Radioelectronics. 2019, no. 11, pp. 12–19. doi: 10.18127/j20700784-201911-03 (In Russ.)

18. Monakov A. A., Nesterov M. Yu. Statistical Properties of Altimeter Signals Scattered From a Rough Cylindrical Surface. J. Achievements of Modern Radioelectronics. 2015, no. 12, pp. 51–66. (In Russ.)

19. Monakov A. A., Nesterov M. Yu. Statistical Properties of FMCW Radar Altimeter Signals Scattered from a Rough Cylindrical Surface. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2017, vol. 53, no. 1, pp. 323–333. doi: 10.1109/TAES.2017.2650498

20. Brown G. S. The Average Impulse Response of a Rough Surface and Its Applications. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1977, vol. AP-25, no. 1, pp. 67–74. doi: 10.1109/TAP.1977.1141536 (In Russ.)

21. Borodin M. A., Mikhaylov V. N., Filippova P. A. Doppler Spectrum Mathematical Model of Signal Scattering From Sea Surface at Low Grazing Angles. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 3, pp. 63–73. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-63-73 (In Russ.)

22. Borodin M. A. Simulating the Profile of a Radio Altimeter Echo Signal. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 4, pp. 52–62. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-4-52-62 (In Russ.)

23. Borovitsky D. S., Zhesterev A. E., Ipatov V. P., Mamchur R. M. Radar Altimeter Echo-Signal Analytical Model. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2017, vol. 17, no. 3, pp. 39–45. (In Russ.)

24. Borovitsky D. S., Zhesterev A. E., Ipatov V. P., Mamchur R. M. The Space-Based Altimeter Echo-Signal when Doppler Scattering is taken Into Account. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2017, vol. 17, no. 3, pp. 46–51. (In Russ.)

25. Fedoryuk M. V. *Asimptotika: integraly I ryady* [Asymptotic: Integrals and Series]. Moscow, Nauka, 1987, 544 p. (In Russ.).

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>

Сопровождение маневрирующих целей с использованием многомодельного алгоритма с переменной структурой

Ле Минь Хоанг^{1✉}, А. А. Коновалов², Дао Ван Лук¹

¹ Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам

² НИИ "Прогноз", Санкт-Петербург, Россия

✉ lehoang.navy@gmail.com

Аннотация

Введение. В последние годы большое внимание уделяется разработке методов траекторной фильтрации для сопровождения маневрирующих целей. Общеизвестными методами фильтрации параметров траекторий маневрирующих целей являются многомодельные (Multiply-Model – ММ) алгоритмы. Традиционные ММ-алгоритмы имеют фиксированную структуру. Однако для высокоманевренных целей приходится использовать достаточно большой набор моделей, перекрывающий весь диапазон возможных маневров, при том что увеличение числа моделей не гарантирует повышение точности сопровождения. Для преодоления указанных проблем были предложены ММ-алгоритмы с переменной структурой (Variable Structure ММ – VSMM). В настоящей статье для сопровождения надводных целей, совершающих поворот с постоянной скоростью, предлагаются два алгоритма VSMM. Это алгоритмы с переменным набором моделей, использующие методы адаптивной сетки и переключения сетки.

Цель работы. Разработка адаптивного алгоритма траекторного сопровождения, использующего модель постоянного поворота для сопровождения надводных маневрирующих объектов.

Материалы и методы. Полученный алгоритм основан на теории сеточной адаптации в ММ-методах оценивания и используется для оценки компонент векторов координат и скорости надводных маневрирующих целей. Эффективность алгоритма оценивалась с помощью компьютерного статистического моделирования в среде MATLAB.

Результаты. В статье построена структура адаптивного алгоритма VSMM. Проведено моделирование, демонстрирующее работоспособность алгоритма. В рассмотренных сценариях моделирования алгоритм дает эффективные оценки векторов координат и скорости надводных маневрирующих целей.

Заключение. Результаты моделирования показывают, что использование адаптивных алгоритмов существенно повышает эффективность сопровождения по сравнению с ММ-алгоритмом с фиксированной структурой и при этом экономит вычислительные ресурсы.

Ключевые слова: сопровождение цели, многомодельный алгоритм, IMM-алгоритм, VSMM-алгоритм, алгоритм адаптивной сетки, алгоритм переключения сетки, модель постоянного поворота

Для цитирования: Ле Минь Хоанг, Коновалов А. А., Дао Ван Лук. Сопровождение маневрирующих целей с использованием многомодельного алгоритма с переменной структурой // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 3. С. 77–89. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-77-89

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.04.2023; принята к публикации после рецензирования 10.05.2023; опубликована онлайн 29.06.2023



Tracking of Maneuvering Targets Using a Variable Structure Multiple Model Algorithm

Le Minh Hoang¹✉, Aleksandr A. Konovalov², Dao Van Luc¹

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

² Research Institute "Prognoz", St Petersburg, Russia

✉ lehoang.navy@gmail.com

Abstract

Introduction. In recent years, much attention has been paid to the development of trajectory filtering methods for tracking maneuvering targets. Multi-model (MM) algorithms are widely used for filtering maneuvering targets. Conventional MM algorithms are characterized by a fixed structure. However, highly maneuvering targets require a sufficiently large set of models covering the entire range of possible maneuvers, although an increase in the number of models cannot ensure an increase in the accuracy of tracking. To overcome these problems, multiple model algorithms with a variable structure (VSMM) were proposed. This article proposes two VSMM algorithms for tracking maritime targets performing a coordinated turn at constant speed. These are algorithms with a variable set of models based on adaptive grid and switching grid methods.

Aim. To develop an adaptive trajectory tracking algorithm that uses a constant turn model to track maneuvering surface objects.

Materials and methods. The resulting algorithm is based on the theory of grid adaptation in multi-model estimation methods and is used to estimate the components of the coordinate and velocity vectors of surface maneuvering targets. The algorithm efficiency was evaluated using computer statistical modeling in the MATLAB environment.

Results. The structure of an adaptive VSMM algorithm was described. Simulations were carried out to confirm the algorithm efficiency. In the considered simulation scenarios, the algorithm produces effective estimates of the coordinate vectors and speed of surface maneuvering targets.

Conclusion. Adaptive algorithms improve the efficiency of target tracking in comparison with multi-model algorithms with a fixed structure, at the same time as saving computational resources.

Keywords: target tracking, multiply model algorithm, IMM algorithm, VSMM algorithm, adaptive grid algorithm, switching grid algorithm, coordinated turn model

For citation: Le Minh Hoang, Konovalov A. A., Dao Van Luc. Tracking of Maneuvering Targets Using a Variable Structure Multiple Model Algorithm. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 3, pp. 77–89. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-77-89

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

Submitted 04.04.2023; accepted 10.05.2023; published online 29.06.2023

Введение. Объем грузовых и пассажирских перевозок морским и речным транспортом увеличивается с каждым годом. Как следствие, возрастают требования к системам безопасности на водном транспорте. Среди мер по повышению безопасности мореплавания важное место занимает совершенствование методов обработки данных в системах управления судами, в том числе радиолокационных данных, поступающих от береговых РЛС. Одним из этапов обработки радиолокационной информации является построение траекторий движения надводных объектов. Многие из наблюдаемых береговыми РЛС надводных целей относятся к

категории маневрирующих, что требует использования соответствующих алгоритмов траекторной фильтрации.

В настоящее время общепризнанными методами фильтрации параметров траекторий маневрирующих целей являются многомодельные (Multiply-Model – MM) алгоритмы [1–3]. Они характеризуются тем, что в каждый момент времени используют не одну, а сразу несколько моделей движения цели, каждая из которых отражает возможные режимы ее движения. Формируя оценки параметров траектории для каждой модели и оценивая их правдоподобие, фильтр вычис-

ляет результирующую оценку вектора состояния как взвешенную сумму этих локальных оценок.

Традиционные ММ-алгоритмы, среди которых наиболее популярным является интерактивный многомодельный алгоритм (Interactive Multiple Model – IMM) [4–6], относят к классу алгоритмов с фиксированной структурой (Fixed Structure MM – FSMM) – у них набор моделей и их параметров задан раз и навсегда еще до начала работы фильтра. Однако такой подход имеет определенные недостатки. Для целей, режим маневрирования которых неизвестен, приходится использовать достаточно большой набор моделей, перекрывающий весь диапазон возможных маневров, что существенно увеличивает объем вычислений. Кроме того, увеличение числа моделей не гарантирует повышение точности сопровождения, поскольку возникает конкуренция между моделями.

Для преодоления указанных проблем были предложены многомодельные алгоритмы с переменной структурой (Variable Structure MM – VSMM) [7, 8], суть которых заключается в адаптации параметров или структуры алгоритма в зависимости от характера движения цели [9]. Существуют различные направления адаптации, среди которых чаще всего рассматриваются два многомодельных метода сеточной адаптации [10]: алгоритм адаптивной сетки (Adaptive Grid – AGMM) [11] и переключаемой сетки (Switching Grid – SGMM) [12]. Сетка используется для описания множественных моделей. Это набор значений в непрерывном интервале параметра маневра цели (например, скорости поворота при использовании модели Constant Turn (CT)). Алгоритм адаптивной сетки определяет значения точек сетки, которые задаются набору фильтров на каждом шаге оценивания в качестве параметров настройки из непрерывного интервала параметра маневра, алгоритм переключаемой сетки осуществляет переключение среди заранее определенных наборов моделей внутри того же интервала.

В литературе описано применение алгоритмов AGMM и SGMM для сопровождения воздушных объектов, совершающих координированный поворот [13] и линейное ускорение [14]. Целью настоящей работы является исследование возможности применения сеточных

адаптивных многомодельных алгоритмов для сопровождения надводных целей при помощи береговой РЛС, а также сравнение их эффективности с алгоритмом IMM при разных параметрах настройки.

ММ с переменной структурой. Набор моделей алгоритма IMM фиксирован и обычно включает в себя большое количество моделей, перекрывающих весь диапазон возможных маневров. Например, для целей, совершающих интенсивные повороты с постоянной скоростью, это одна модель для прямолинейного движения (Constant Velocity – CV) и 4–8 моделей СТ, рассчитанных на разные скорости поворота. Соответственно, в IMM используется 5–9 работающих параллельно фильтров. На очередном шаге оценивания считается, что каждая из этих моделей может соответствовать истинному режиму движения цели. По отметке, присвоенной траектории, вычисляются оценки фильтров, оцениваются правдоподобия моделей, результирующая оценка находится как сумма локальных оценок, взвешенная с учетом этих правдоподобий и заданных вероятностей перехода.

Многомодельный алгоритм с переменной структурой VSMM имеет более компактный набор моделей, структура и параметры которых адаптивно подстраиваются под изменяющийся режим движения цели. На рис. 1 представлена обобщенная структурная схема VSMM. По сравнению с базовым алгоритмом IMM алгоритм VSMM имеет модуль адаптации набора моделей. Он используется для определения набора моделей, которые будут задействованы в данный момент времени. В зависимости от результатов работы фильтра каждой модели (т. е. их векторов состояния и правдоподобий) оцениваются значения параметра (скорости поворота) для всего набора моделей с тем, чтобы новый набор более точно соответствовал истинному режиму движения цели.

В данной статье исследуются два метода адаптации набора моделей. Каждый из них использует три модели, настроенные на свои скорости поворота. Основная идея метода адаптивной сетки заключается в том, что значение скорости поворота для каждой модели выбирается из непрерывного множества, тогда как в методе

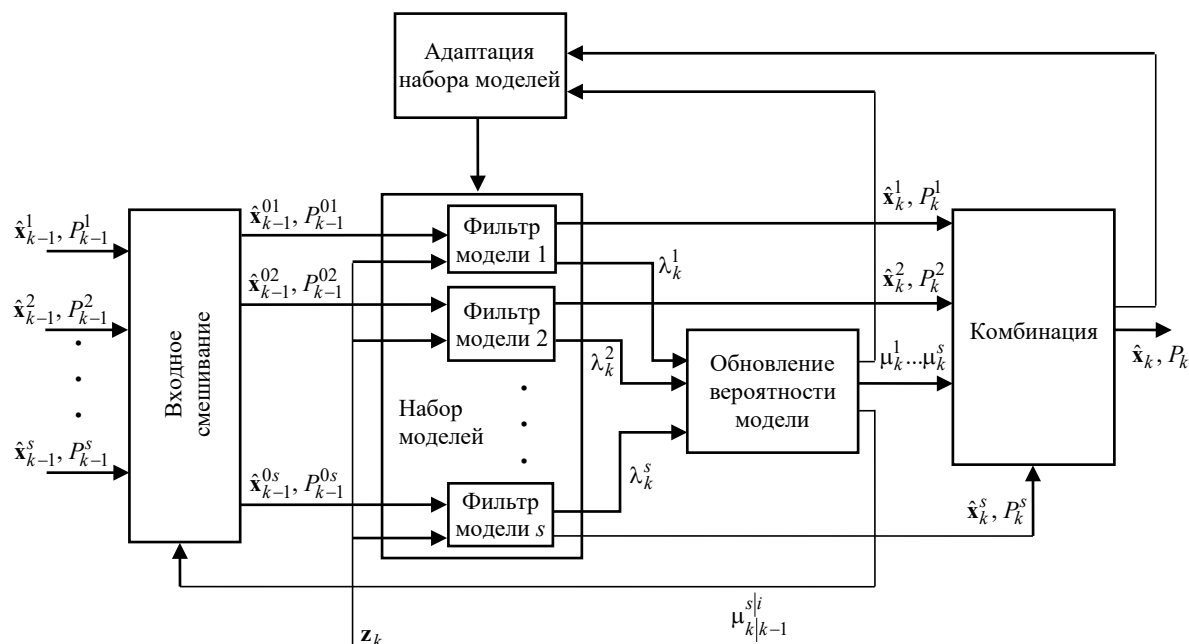


Рис. 1. Схема алгоритма ММ с переменной структурой
Fig. 1. Scheme of the MM algorithm with variable structure

переключаемой сетки используется один из предварительно заданных наборов значений.

Таким образом, в целом алгоритм VSMM подобен стандартному алгоритму IMM, однако имеет один дополнительный этап – адаптацию набора моделей, для чего в нашем исследовании применяются алгоритмы AG и SG.

Алгоритм VSMM состоит из следующих шести шагов.

1. Адаптация набора моделей.

1.1. Алгоритм адаптивной сетки. Предположим, что реальная скорость поворота маневрирующей цели в настоящий момент неизвестна, но находится в непрерывном интервале $[-\omega_{\max}, \omega_{\max}]$, где $\omega_{\max}$ – максимально возможное значение скорости поворота данной цели с учетом физических ограничений. Создадим

изменяющийся во времени набор из трех моделей, который в некоторый k -й момент времени имеет вид $M_k = [\omega_L^k \ \omega_C^k \ \omega_R^k]$, где значения скоростей поворота каждой модели (значений сетки) $(\omega_L^k, \omega_C^k, \omega_R^k) \in [-\omega_{\max}, \omega_{\max}]$, $k = 1, 2, \dots, N$. Буквы L, C, R обозначают, соответственно, левую, центральную и правую модели конфигурации MM.

Схема сдвига моделей в алгоритме AG представлена на рис. 2. Верхняя линия показывает диапазон возможных скоростей поворота $[-\omega_{\max}, \omega_{\max}]$. В каждый момент времени набор моделей AG содержит три модели, т. е. правую, центральную и левую модели. Стрелка от одной модели к другой указывает на

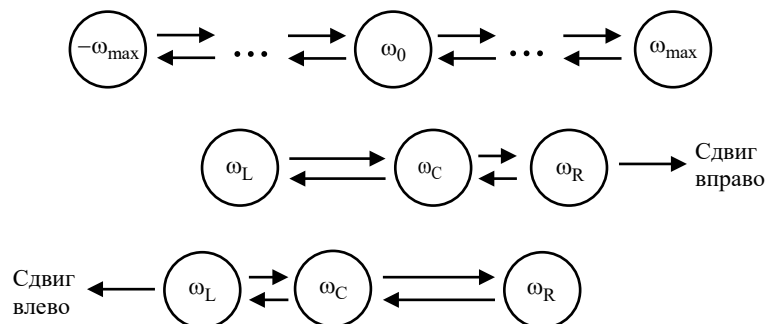


Рис. 2. Схема сдвига моделей алгоритма адаптивной сетки
Fig. 2. Scheme of model shift in adaptive grid algorithm

направление сдвига модели. Стрелки по обеим сторонам обозначают возможное смещение вправо или влево. Как центр набора моделей, так и расстояние между ними могут быть скорректированы в соответствии с заданным правилом принятия решения.

В алгоритме VSMM со схемой адаптивной сетки правило принятия решения состоит из двух основных элементов: во-первых, перенастройки центра сетки, во-вторых, перенастройки расстояния по сетке. Центр сетки – это параметр центральной модели (ω_C^k), а расстояние (шаг) сетки – это интервал между параметрами любых двух соседних моделей. Истинное значение параметра текущей скорости поворота находится в пределах области значений параметра всей совокупности набора моделей. Однако если истинное значение параметра находится за пределами этой области или вблизи ее границы, этот факт должен быть немедленно обнаружен и предприняты соответствующие действия по адаптации набора моделей, к которым относятся сдвиг моделей и расширение области значений параметра.

Алгоритм VSMM первоначально запускается с исходными значениями $M_0 = [\omega_L^0 \quad \omega_C^0 \quad \omega_R^0]$, выбор которых обусловлен теми же соображениями, что и для обычного IMM [15]. На каждом шаге оценивания при необходимости подстраиваются два параметра: центр сетки и шаг сетки.

Корректировка центра сетки. Положение центра сетки изменяется, если апостериорная вероятность модели центра μ_C^k падает ниже некоторого заранее заданного порогового значения t_1 , и определяется из выражения

$$\omega_C^{k+1} = \sum_{i=1}^N \mu_i^k \omega_i^k,$$

где μ_i^k – апостериорная вероятность i -й модели в момент времени k . В противном случае положение набора моделей не изменяется, т. е. $\omega_C^{k+1} = \omega_C^k$.

Корректировка шага сетки. Расстояние сетки настраивается согласно следующим правилам:

1. Если максимальную вероятность среди

всех моделей имеет центральная модель, т. е. $\mu_C^k = \max \{\mu_i^k\}_{i=1, N}$, то сдвига моделей нет.

Если при этом левая и/или правая модель будут определены как маловероятные (т. е. апостериорная вероятность модели окажется меньше выбранного порогового значения t_2), соответствующее расстояние данной модели будет уменьшено наполовину:

$$\omega_L^{k+1} = \begin{cases} \omega_C^{k+1} - \delta_L^k / 2, & \text{если } \mu_L^k < t_2, \\ \omega_C^{k+1} - \delta_L^k, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$\omega_R^{k+1} = \begin{cases} \omega_C^{k+1} + \delta_R^k / 2, & \text{если } \mu_R^k < t_2, \\ \omega_C^{k+1} + \delta_R^k, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где $\delta_L^k = \max(\omega_C^k - \omega_L^k, r)$, $\delta_R^k = \max(\omega_R^k - \omega_C^k, r)$ и t_2 – порог для обнаружения маловероятной модели (например, 0.05); r – расстояние модели (параметр проектирования). Это действие поможет сократить диапазон значений скоростей и уменьшить ошибки оценивания.

2. Если максимальную вероятность среди всех моделей имеет левая модель, т. е. $\mu_L^k = \max \{\mu_i^k\}_{i=1, N}$, производится сдвиг влево:

$$\omega_L^{k+1} = \begin{cases} \omega_C^{k+1} - 2\delta_L^k, & \text{если } \mu_L^k > t_3, \\ \omega_C^{k+1} - \delta_L^k, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$\omega_R^{k+1} = \omega_C^{k+1} + \delta_R^k,$$

где t_3 – порог обнаружения значимой модели (например, 0.95). При этом левая часть области значений параметра расширяется, расстояние между центром и левой моделью увеличивается в 2 раза.

3. Если максимальную вероятность среди всех моделей имеет правая модель, т. е. $\mu_R^k = \max \{\mu_i^k\}_{i=1, N}$, производится сдвиг вправо:

$$\omega_L^{k+1} = \omega_C^{k+1} - \delta_L^k;$$

$$\omega_R^{k+1} = \begin{cases} \omega_C^{k+1} + 2\delta_R^k, & \text{если } \mu_R^k > t_3, \\ \omega_C^{k+1} + \delta_R^k, & \text{иначе,} \end{cases}$$

при этом правая часть области значений пара-

метра расширяется, расстояние между центром и правой моделью увеличивается в 2 раза.

1.2. Алгоритм переключения сетки. Как и в алгоритме адаптивной сетки, считается, что реальная скорость поворота маневрирующей цели в каждый конкретный момент неизвестна, но находится в непрерывном интервале $[-\omega_{\max}, \omega_{\max}]$. Этот интервал разбивается на большое число значений $M = \{\omega_i\}$:

$$\omega_i = i \frac{\omega_{\max}}{n}; i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm n,$$

каждое из которых становится параметром модели.

При разбиении интервала можно следовать тем же принципам, что и при формировании набора моделей для алгоритма IMM с фиксированной структурой. Далее из этого набора моделей формируется подмножество из трех моделей, которое и будет соответствовать режиму движения в каждый конкретный момент времени, т. е. набор моделей в любой k -й момент времени имеет вид $M_k = [\omega_{i-1}, \omega_i, \omega_{i+1}]$. Схема переключения сетки в алгоритме SG представлена на рис. 3.

Адаптация набора моделей заключается в выборе такого набора $M_k \subset M$, который в наибольшей степени соответствует текущему режиму движения цели.

Логика переключения набора моделей настраивается в соответствии со следующим правилом:

$$M_{k+1} = \begin{cases} M_{i-1}, & \text{если } \mu_{i-1}^k > t; \\ M_i, & \text{если } \mu_i^k > t; \\ M_{i+1}, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где t – порог выбора центрального режима (параметр разработки).

Логика переключения алгоритма можно описать следующим образом: изначально принимается решение о присвоении априорно наиболее вероятного подмножества моделей (логика аналогична выбору набора моделей в алгоритме с фиксированной структурой). Затем на каждом шаге оценивания проверяется апостериорная вероятность для каждой модели и принимается решение о необходимости переключения подмножества. Если такая необходимость установлена, осуществляется изменение подмножества; если нет – сохраняется текущее.

Поскольку рассматриваемые здесь алгоритмы VSMM используют только три фильтра, они имеют существенный выигрыш в вычислительной эффективности по сравнению с IMM с фиксированной структурой.

Далее кратко рассмотрим остальные шаги алгоритма VSMM [16].

2. Вычисление априорных вероятностей перехода:

$$\mu_{k|k-1}^{s|i} = \frac{\pi_{is} \mu_{k-1}^i}{\sum_{m_s \in M_{k-1}} \pi_{is} \mu_{k-1}^i},$$

где π_{is} – вероятность перехода от i -й к s -й модели; μ_{k-1}^i – вероятность i -й модели на $(k-1)$ -м шаге оценивания. Здесь и далее индекс i отно-

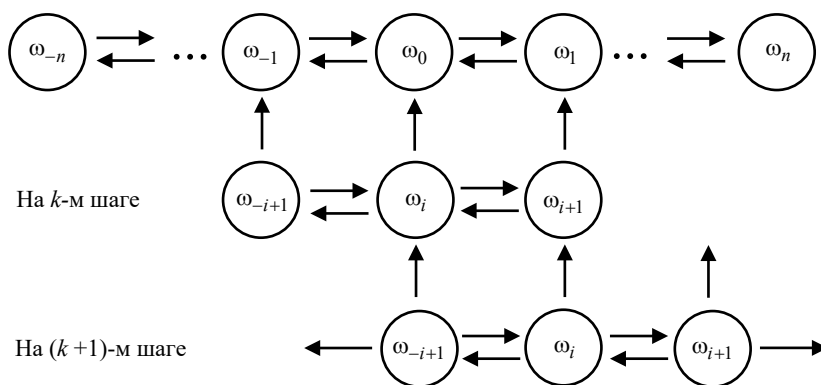


Рис. 3. Схема переключения сетки

Fig. 3. Switching grid scheme

сится к моделям на $(k-1)$ -м шаге, индекс s – к моделям на k -м шаге.

3. Определение начальных условий каждого фильтра s -й модели:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{0s} = \sum_{m_s \in M_{k-1}} \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^i \mu_{k|k-1}^{s|i};$$

$$\hat{P}_{k-1}^{0s} = \sum_{m_s \in M_{k-1}} \mu_{k|k-1}^{s|i} \left[P_{k-1}^i + \left(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^i - \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{0s} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^i - \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{0s} \right)^T \right],$$

где $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^i$ и P_{k-1}^i – вектор состояния и ковариация i -й модели на $(k-1)$ -м шаге.

4. Фильтрация:

– экстраполированная оценка вектора состояния и его ковариация:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^s = F \left(M_{k-1}^s \right) \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{0s};$$

$$P_{k|k-1}^s = F \left(M_{k-1}^s \right) P_{k-1}^{0s} F \left(M_{k-1}^s \right)^T + Q_{k-1}^s,$$

где F – матрица экстраполяции, зависящая от модели M_{k-1}^s ; Q_{k-1}^s – ковариация шума процесса;

– экстраполированная оценка вектора измерения:

$$\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}^s = H \left(M_{k-1}^s \right) \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^s,$$

где H – матрица наблюдения;

– вектор невязки и его ковариационная матрица:

$$\mathbf{y}_k^s = \mathbf{z}_k - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}^s;$$

$$S_k^s = H \left(M_k^s \right) P_{k|k-1}^s H \left(M_k^s \right)^T + R_k,$$

где $\mathbf{z}_k$ и R_k – текущее измерение и его ковариация;

– матричный коэффициент Калмана:

$$K_k^s = P_{k|k-1}^s H \left(M_k^s \right)^T \left(S_k^s \right)^{-1};$$

– вектор состояния и его ковариационная матрица:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^s = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^s + K_k^s \mathbf{y}_{k-1}^s;$$

$$P_k^s = P_{k|k-1}^s - K_k^s S_k^s \left(K_k^s \right)^T.$$

5. Вычисление апостериорных вероятностей истинности моделей:

$$\mu_k^s = \frac{\Lambda_k^s \sum_{m_s \in M_k} \pi_{is} \mu_{k-1}^i}{\sum_{m_s \in M_k} \pi_{is} \mu_{k-1}^i \Lambda_k^s},$$

где

$$\Lambda_k^s = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^m |S_k^s|}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\mathbf{y}_k^s \right)^T \left(S_k^s \right)^{-1} \left(\mathbf{y}_k^s \right) \right]$$

– функция правдоподобия (m – размер векторов $\mathbf{z}$ и $\mathbf{y}$).

6. Результат оценки вектора состояния и его ковариационной матрицы:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \sum_{m_s \in M_k} \hat{\mathbf{x}}_k^s \mu_k^s;$$

$$P_k = \sum_{m_s \in M_k} \mu_k^s \left\{ P_k^s + \left[\hat{\mathbf{x}}_k^s - \hat{\mathbf{x}}_k \right] \left[\hat{\mathbf{x}}_k^s - \hat{\mathbf{x}}_k \right]^T \right\}.$$

Моделирование. С целью анализа и оценки эффективности предложенных адаптивных алгоритмов рассматриваются сценарии сопровождения двух маневрирующих целей, истинные траектории движения для которых приведены на рис. 4 и 11 соответственно. На рис. 5 и 12

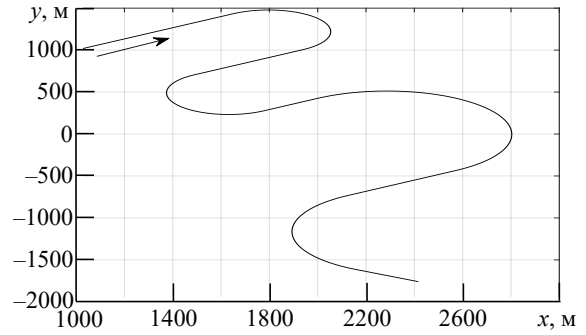


Рис. 4. Истинная траектория цели 1

Fig. 4. Target 1 true trajectory

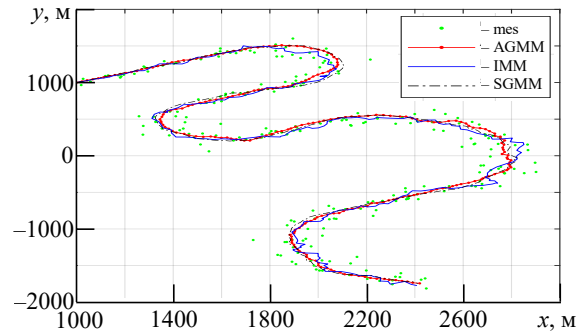


Рис. 5. Траектория цели 1 после фильтрации

Fig. 5. Target 1 trajectory after filtering

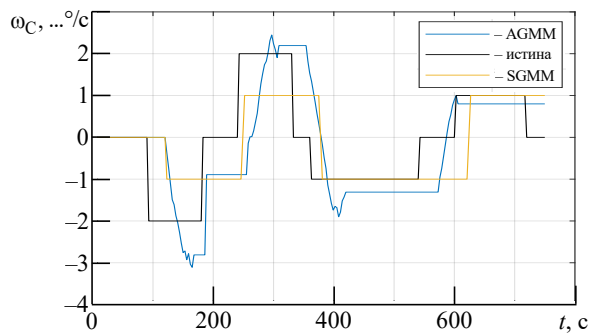


Рис. 6. Изменения скорости поворота цели 1

Fig. 6. Target 1 turn rate changes

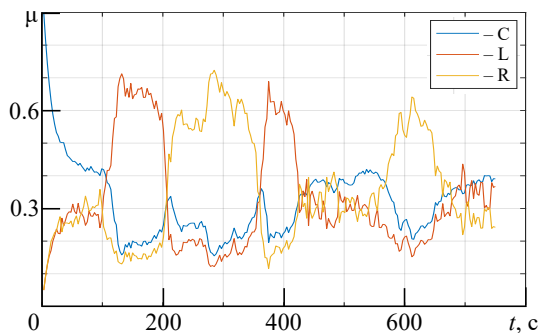


Рис. 7. Вероятности моделей в SGMM

Fig. 7. Model probabilities in SGMM

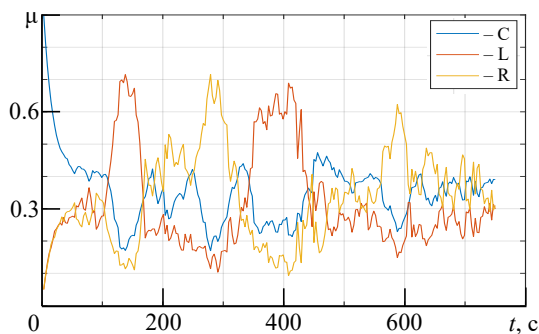


Рис. 8. Вероятности моделей в AGMM

Fig. 8. Model probabilities in AGMM

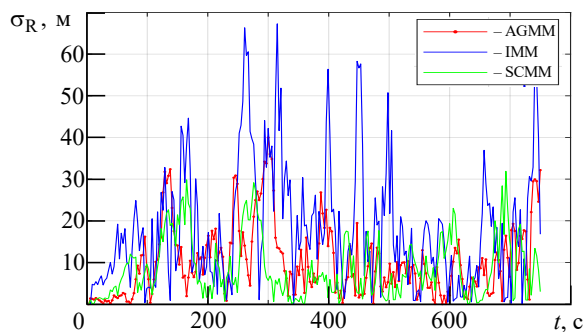


Рис. 9. СКО по координатам

Fig. 9. Position RMSE

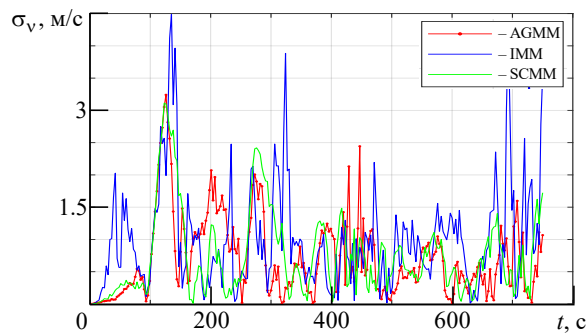


Рис. 10. СКО по скорости

Fig. 10. Velocity RMSE

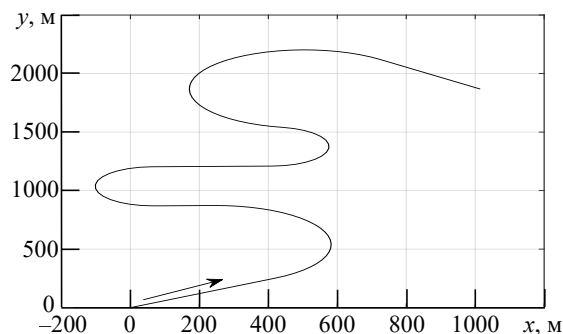


Рис. 11. Истинная траектория цели 2

Fig. 11. Target 2 true trajectory

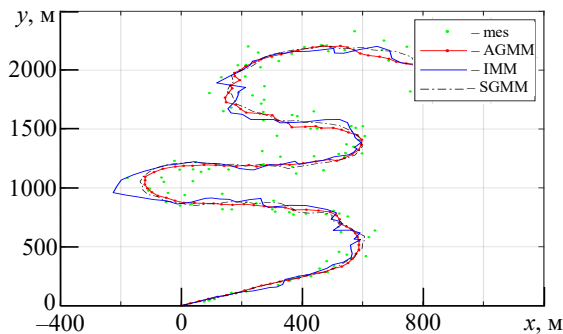


Рис. 12. Траектория цели 2 после фильтрации

Fig. 12. Target 2 trajectory after filtering

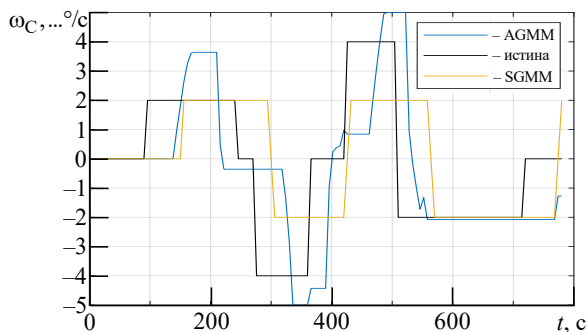


Рис. 13. Изменения скорости поворота цели 2

Fig. 13. Target 2 turn rate changes

представлены траектории целей после фильтрации: зелеными точками показаны зашумленные измерения (СКО по дальности $\sigma_p = 60$ м, по азимуту $\sigma_\alpha = 0.5^\circ$, период обзора

3 с), линиями – результаты работы разных фильтров (IMM, AGMM, SGMM). На рис. 6 и 13 представлены изменения скорости поворота центральной модели, на рис. 7, 8, 14, 15 – веро-

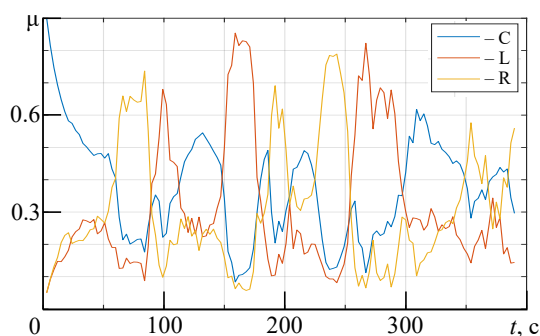


Рис. 14. Вероятности моделей в AGMM

Fig. 14. Model probabilities in AGMM

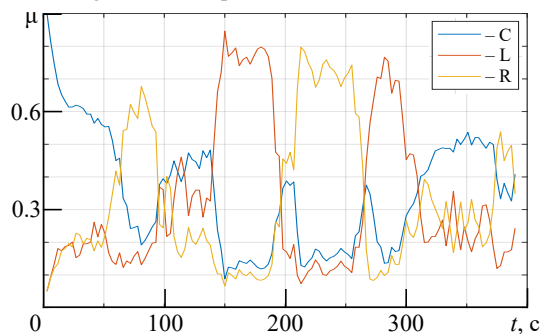


Рис. 15. Вероятности моделей в SGMM

Fig. 15. Model probabilities in SGMM

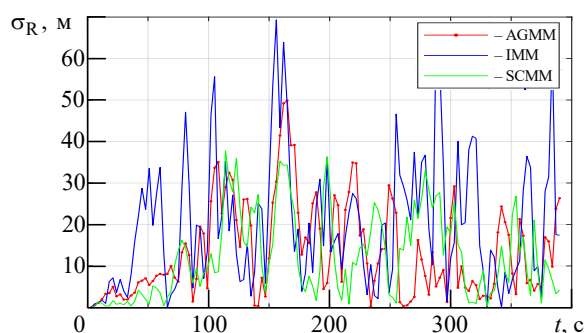


Рис. 16. СКО по координатам

Fig. 16. Position RMSE

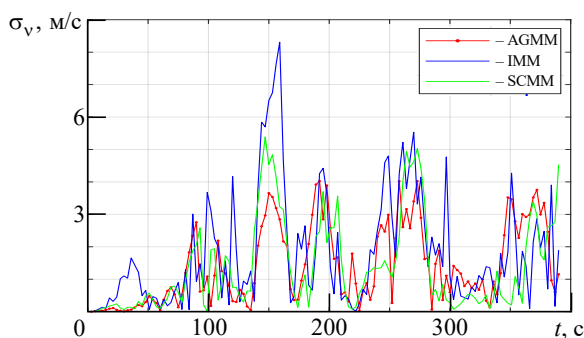


Рис. 17. СКО по скорости

Fig. 17. Velocity RMSE

ятности моделей, на рис. 9 и 16 – зависимости СКО оценки координат цели от времени, на рис. 10 и 17 – зависимости СКО скорости от времени. Результаты усреднены по 500 реализациям.

Табл. 1. Параметры движения цели

Tab. 1. Target movement parameters

Время, с	Скорость поворота, ...°/с
0...90	0
90...180	–2
180...240	0
240...330	2
330...360	0
360...540	–1
540...600	0
600...750	1

Пример 1. Цель движется сначала с постоянной скоростью, затем совершает несколько поворотов (табл. 1). Начальное состояние цели $x_0 = y_0 = 1000$ м; $v_{0x} = 15$ уз; $v_{0y} = 10$ уз; общее время движения 750 с.

Для сравнения используется алгоритм IMM с пятью фиксированными моделями со скоростями поворота $M = [-2, -1, 0, 1, 2]$. Подмножество набора моделей для SGMM: $M_1 = [-2, -1, 0]$; $M_2 = [-1, 0, 1]$; $M_3 = [0, 1, 2]$. Начальные вероятности моделей IMM $\mu_0 = [0.9 \ 0.025 \ 0.025 \ 0.025 \ 0.025]$. Порог для SGMM $t = 0.7$; для AGMM $t_1 = 0.3$; $t_2 = 0.25$; $t_3 = 0.75$; $\omega_{\max} = 3^\circ/\text{с}$; матрица переходных вероятностей:

$$\pi_{is} = \begin{cases} 0.9, & \text{если } i = s; \\ \frac{0.1}{N-1}, & \text{если } i \neq s, \end{cases}$$

где N – количество моделей.

Пример 2. Начальное состояние цели $x_0 = y_0 = 0$ м; $v_{0x} = 20$ уз; $v_{0y} = 12$ уз; $\sigma_p = 60$ м; $\sigma_\alpha = 0.5^\circ$. Общее время движения 390 с, скорости поворота указаны в табл. 2. Истинная траектория движения цели показана на рис. 11.

Табл. 2. Параметры движения цели

Tab. 2. Target movement parameters

Время, с	Скорость поворота, ...°/с
0...45	0
45...120	2
120...135	0
135...180	–4
180...210	0
210...255	4
255...360	–2
360...390	0

Табл. 3. Сравнение эффективности алгоритмов
Tab. 3. Comparison of the efficiency of algorithms

Алгоритм	Пример 1				Пример 2			
	Пиковое СКО		Среднее СКО		Пиковое СКО		Среднее СКО	
	по координатам, м	по скорости, м/с	по координатам, м	по скорости, м/с	по координатам, м	по скорости, м/с	по координатам, м	по скорости, м/с
IMM	69.52	4.74	17.62	0.91	80.66	7.83	23.15	2.08
AGMM	39.92	3.26	10.21	0.75	51.83	6.68	11.37	1.36
SGMM	43.12	3.31	13.25	0.74	49.59	5.99	11.55	1.40

Набор моделей для IMM: $M = [-4, -2, 0, 2, 4]$.
Подмножества наборов моделей для SGMM:
 $M_1 = [-4, -2, 0]$; $M_2 = [-2, 0, 2]$; $M_3 = [0, 2, 4]$.
Порог для SGMM $t = 0.7$, для AGMM $t_1 = 0.3$;
 $t_2 = 0.2$; $t_3 = 0.8$; $\omega_{\max} = 5^\circ/\text{с}$.

Как следует из результатов моделирования, при прямолинейном движении ошибки положения и скорости двух алгоритмов относительно схожи. Когда цель совершает маневры, разница в ошибках положения и скорости трех алгоритмов более заметна, особенно когда цель совершает интенсивные маневры. В целом алгоритмы VSMM обладают большей стабильностью и адаптивностью, чем алгоритм IMM. Однако для алгоритма SGMM важное значение имеет адекватный выбор подмножества набора моделей движения цели, тогда как для алгоритма AGMM набор моделей автоматически адаптируется в пределах $[-\omega_{\max}, \omega_{\max}]$. В табл. 3 приведено сравнение значения СКО по позиции и скорости трех алгоритмов.

Из табл. 3 видно, что результаты фильтрации двух предложенных алгоритмов (AGMM и SGMM) в обоих примерах относительно близки друг другу и явно лучше, чем у алгоритма IMM.

На рис. 18 представлен результат исследова-

ния влияния выбора значения параметра t на изменение значения скорости поворота центральной модели в алгоритме SGMM для примера 2, при двух значениях параметра $t = 0.3$ и $t = 0.7$. Чем больше значение t , тем реже изменяется значение центральной модели, и, наоборот, чем меньше t , тем чаще оно изменяется. При этом при большом t имеется задержка переключения относительно истинного значения, а при малом t имеют место ложные переключения. При очень большом значении t (для данного примера при $t > 0.87$) вероятность любой модели никогда не превосходит t , поэтому значение центральной модели либо не изменяется, что приводит к тому, что алгоритм SGMM действует как алгоритм IMM с 3 фиксированными моделями, либо изменяется в одном направлении, пока не будет достигнуто предельное значение.

Для алгоритма AGMM, когда вероятность центральной модели падает ниже заданного порога t_1 , значение центральной модели будет пересчитано, а если выше – сохранено текущее значение. Поэтому, когда значение t_1 велико, значение центральной модели будет пересчитываться чаще, повышая тем самым скорость реакции на изменение параметра маневра, однако это также приводит к появлению переход-

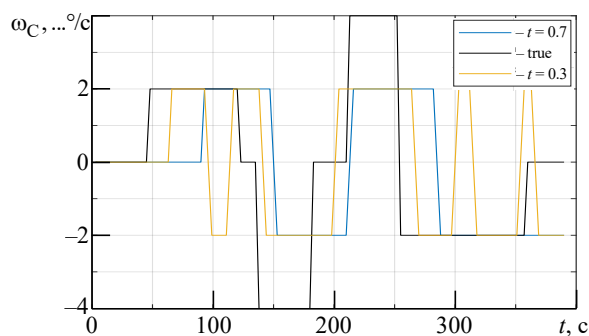


Рис. 18. Влияние выбора значений параметров t на изменения значения центральной модели алгоритма SGMM

Fig. 18. Influence of the selected parameters t on changes in the central model of the SGMM algorithm

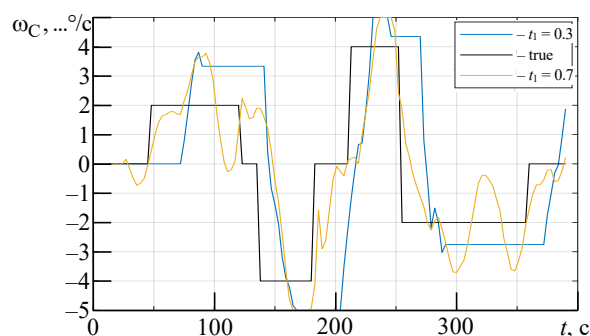


Рис. 19. Влияние выбора значений параметра t_1 на изменение значения центральной модели алгоритма AGMM

Fig. 19. Influence of the selected parameters t_1 on changes in the central model of the AGMM algorithm

ных процессов. При малом значении t_1 алгоритм реагирует позже, подобранное значение параметра центральной модели несколько превосходит истинное значение параметра маневра. На рис. 19 представлено влияние выбора значения параметра t_1 на изменения скорости поворота центральной модели в примере 2 при $t_1 = 0.3$ и $t_1 = 0.7$.

Сравнивая поведение алгоритмов SGMM и AGMM при разных значениях параметров t и t_1 , можно сделать вывод о целесообразности использования значений, принятых в первой части моделирования: $t = 0.7$ и $t_1 = 0.3$.

Заключение. Рассмотрены алгоритмы многомодельной траекторной фильтрации с переменной структурой для сопровождения маневрирующих надводных целей. Эти алгоритмы

используют усеченный по сравнению с алгоритмом IMM с фиксированной структурой набор моделей движения совместно с соответствующим правилом принятия решения об изменении параметров моделей, разработанным на основе схем адаптивной сетки и переключения сетки. Результаты моделирования показывают, что предложенный метод позволяет более точно сопровождать маневрирующие цели, чем традиционный IMM. Кроме того, поскольку здесь меньше фильтров, алгоритмы требуют меньших вычислительных затрат. Предлагаемые адаптивные методы имеют близкие характеристики траекторного сопровождения, в том числе высокую точность и хорошую адаптируемость к различным маневрам цели. При этом алгоритм AGMM обладает несколько большей адаптивностью, чем алгоритм SGMM.

Список литературы

1. Bar-Shalom Y., Li X. R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation. New York: Wiley & Sons, 2001. 558 p.
2. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Part V: Multiple-Model Methods // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2005. Vol. 41, № 4. P. 1255–1321. doi: 10.1109/TAES.2005.1561886
3. Рязанцев Л. Б. Многомодельное байесовское оценивание вектора состояния маневренной воздушной цели в дискретном времени // Вестн. ТГТУ. 2009. № 4. С. 729–739.
4. Blom H. A. P., Bar-Shalom Y. The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients // IEEE Transactions on Automatic Control. 1988. Vol. 33, № 8. P. 780–783. doi: 10.1109/9.1299
5. Li X. R., Bar-Shalom Y. Design of an interacting multiple model algorithm for air traffic control tracking // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 1993. Vol. 1, № 3. P. 186–194. doi: 10.1109/87.251886
6. Бакулев П. А., Сычев М. И., Лыу Н. Ч. Сопровождение маневрирующей цели с помощью интерактивного многомодельного алгоритма // Тр. МАИ. Электронный журн. 2002. № 9. С. 1–8. URL: <https://mai.ru/publications/index.php?ID=34587> (дата обращения 11.05.23)
7. Li X. R., Bar-Shalom Y. Mode-Set Adaptation in Multiple-Model Estimators for Hybrid Systems // 1992 American Control Conf. Chicago, USA, 24–26 June 1992. IEEE, 1992. P. 1794–1799. doi: 10.23919/ACC.1992.4792420
8. Munir A., Atherton D. P. Adaptive interacting multiple model algorithm for tracking a manoeuvring target // IEE Proc. on Radar, Sonar and Navigation. 1995. Vol. 142, № 1. P. 11–17. doi: 10.1049/ip-rsn:19951528
9. Li X. R. Engineer's guide to variable-structure multiple-model estimation for tracking / Multitarget-multisensor tracking: applications and advances. Vol. III. Boston: Artech House, 2000. P. 499–567.
10. Jilkov V. P., Angelova D. S., Semerdjiev T. A. Design and comparison of mode-set adaptive IMM algorithms for maneuvering target tracking // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1999. Vol. 35, № 1. P. 343–350. doi: 10.1109/7.745704
11. Zhu Z. Shipborne radar maneuvering target tracking based on the variable structure adaptive grid interacting multiple model // J. Zhejiang Univ. Sci. C. 2013. № 14. P. 733–742. doi: 10.1631/jzus.C1200335
12. Li X. R., Zhang Y. M., Zhi X. R. Multiple-model estimation with variable structure. Pt. IV: Design and evaluation of model-group switching algorithm // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1999. Vol. 35, № 1. P. 242–254. doi: 10.1109/7.745695
13. Jilkov V. P., Angelova D. S., Semerdjiev Tz. A. Design and comparison of mode-set adaptive IMM algorithms for maneuvering target tracking // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1999. Vol. 35, № 1. P. 343–350. doi: 10.1109/7.745704
14. Sun H.-M. Adaptive Filtering Techniques in Radar Tracking System with Variable-Structured Multiple-Model Estimator // J. of C.C.I.T. 2005. № 2. P. 27–45.
15. Li X. R., Zhao, Li X.-B. General Model-Set Design Methods for Multiple-Model Approach // IEEE Trans. on Automatic Control. 2005. Vol. 50, № 9. P. 1260–1276. doi: 10.1109/TAC.2005.854581
16. Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Ч. 2. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. 180 с.

Информация об авторах

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

Адрес: Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, ул. Хоанг Куок Вьет, д. 236, район Бак Ты Лиём, Ханой, Вьетнам
E-mail: lehoang.navy@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8913-3296>

Коновалов Александр Анатольевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ "Прогноз". Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – траекторное сопровождение в радиолокационных системах; объединение данных; пассивная бистатическая радиолокация; многопозиционная радиолокация.

Адрес: НИИ "Прогноз", ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197002, Россия
E-mail: al_an_kon@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0004-1943-5394>

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

Адрес: Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, ул. Хоанг Куок Вьет, д. 236, район Бак Ты Лиём, Ханой, Вьетнам
E-mail: daolucvtl01@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8006-3076>

References

1. Bar-Shalom Y., Li X. R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation. New York, Wiley & Sons, 2001, 558 p.
2. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Part V: Multiple-Model Methods. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2005, vol. 41, no. 4, pp. 1255–1321. doi: 10.1109/TAES.2005.1561886
3. Ryazantsev L. B. Multiple-Model Bayesian Estimation of the Maneuvering Aerial Target State Vector in Discrete Time. Transactions TSTU. 2009, no. 4, pp. 729–739. (In Russ.)
4. Blom H. A. P., Bar-Shalom Y. The Interacting Multiple Model Algorithm for Systems with Markovian Switching Coefficients. IEEE Transactions on Automatic Control. 1988, vol. 33, no. 8, pp. 780–783. doi: 10.1109/9.1299
5. Li X. R., Bar-Shalom Y. Design of an Interacting Multiple Model Algorithm for Air Traffic Control Tracking. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 1993, vol. 1, no. 3, pp. 186–194. doi: 10.1109/87.251886
6. Bakulev P. A., Sychev M. I., Lyu N. Ch. Maneuvering Target Tracking Using an Interactive Multiple Model Algorithm. *Trudy MAI*. Electronic J. 2002, no. 9, pp. 1–8. (In Russ.)
7. Li X. R., Bar-Shalom Y. Mode-Set Adaptation in Multiple-Model Estimators for Hybrid Systems. Proc. of the 32nd Conf. on Decision and Control. San Antonio, Texas, Dec. 1992, pp. 1794–1799. doi: 10.23919/ACC.1992.4792420
8. Munir A., Atherton D. P. Adaptive Interacting Multiple Model Algorithm for Tracking a Manoeuvring Target. IEE Proc. on Radar, Sonar and Navigation. 1995, vol. 142, no. 1, pp. 11–17. doi: 10.1049/ip-rsn:19951528
9. Li X. R. Engineer's Guide to Variable-Structure Multiple-Model Estimation for Tracking. Multitarget-Multisensor Tracking: Applications and Advances. Vol. III. Boston, Artech House, 2000, pp. 499–567.
10. Jilkov V. P., Angelova D. S., Semerdjiev T. A. Design and Comparison Of Mode-Set Adaptive IMM Algorithms for Maneuvering Target Tracking. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1999, vol. 35, no. 1, pp. 343–350. doi: 10.1109/7.745704
11. Zhu Zw. Shipborne Radar Maneuvering Target Tracking Based on the Variable Structure Adaptive Grid Interacting Multiple Model. J. Zhejiang Univ. Sci. C. 2013, no. 14, pp. 733–742. doi: 10.1631/jzus.C1200335
12. Li X. R., Zhang Y. M., Zhi X. R. Multiple-Model Estimation with Variable Structure. Part IV: Design and Evaluation of Model-Group Switching Algorithm. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1999, vol. 35, no. 1, pp. 242–254. doi: 10.1109/7.745695
13. Jilkov V. P., Angelova D. S., Semerdjiev Tz. A. Design and Comparison of Mode-Set Adaptive IMM Algorithms for Maneuvering Target Tracking. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1999, vol. 35, no. 1, pp. 343–350. doi: 10.1109/7.745704
14. Sun H.-M. Adaptive Filtering Techniques in Radar Tracking System with Variable-Structured Multiple-Model Estimator. J. of C.C.I.T. 2005, no. 2, pp. 27–45.
15. Li X. R., Zhao, Li X.-B. General Model-Set Design Methods for Multiple-Model Approach. IEEE

Сопровождение маневрирующих целей с использованием
многомодельного алгоритма с переменной структурой
Tracking of Maneuvering Targets Using a Variable Structure Multiple Model Algorithm

Trans. on Automatic Control. 2005, vol. 50, no. 9, pp. 1260–1276. doi: 10.1109/TAC.2005.854581

get Tracking]. Part II. SPb, LETI Publishers, 2014, 180 p. (In Russ.)

16. Konovalov A. A. *Osnovy traektornoy obrabotki radiolokatsyonnoy informatsii* [Basic of the Radar Tar-

Information about the authors

Le Minh Hoang, Specialist in "Radioelectronic Systems and Complexes", 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: lehoang.navy@gmail.com

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

Aleksandr A. Konovalov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of Research Institute "Prognoz" of Saint Petersburg State Electrotechnical University. The author more than 60 scientific publications. Area of expertise: target tracking; data fusion; passive bistatic radars; multi-position radars.

Address: Research Institute "Prognoz", 5 F Professor Popov St., St Petersburg 197002, Russia

E-mail: al an kon@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0004-1943-5394>

Dao Van Luc, Specialist in "Radioelectronic systems and complexes", 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>

A Target Threat Assessment Method for Application in Air Defense Command and Control Systems

Xuan Truong Nguyen ^{1✉}, Kim Phuong Phung¹, Quang Hieu Dang¹, Xung Ha Vo², Hoa Tien Vu¹

¹Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

²National Institute of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

✉truongnx.isi@lqdtu.edu.vn

Abstract

Introduction. This paper presents a solution for threat assessment of air targets using the fuzzy logic inference method. The approach is based on the Sugeno fuzzy model, which has multiple inputs representing target trajectory parameters and a single output representing the target threat value. A set of IF–THEN fuzzy inference rules, utilizing the AND operator, is developed to assess the input information.

Aim. To develop and test an algorithm model to calculate the threat value of an air target for use in real-time automated command and control systems.

Materials and methods. An algorithm model was developed using a fuzzy model to calculate the threat value of a target. The model is presented in the form of a flowchart supported by a detailed stepwise implementation process. The accuracy of the proposed algorithm was evaluated using the available toolkit in MATLAB. Additionally, a BATE software testbed was developed to assess the applicability of the algorithm model in a real-time automated command and control system.

Results. The efficiency of the proposed fuzzy model was evaluated by its simulation and testing using MATLAB tools on a set of 10 target trajectories with different parameters. Additionally, the BATE software was utilized to test the model under various air defense scenarios. The proposed fuzzy model was found to be capable of efficiently computing the threat value of each target with respect to the protected object.

Conclusion. The proposed fuzzy model can be applied when developing tactical supporting software modules for real-time air defense command and control systems.

Keywords: fuzzy logic, fuzzy model, threat value, air defense, command and control system

For citation: Xuan Truong Nguyen, Kim Phuong Phung, Quang Hieu Dang, Xung Ha Vo, Hoa Tien Vu. A Target Threat Assessment Method for Application in Air Defense Command and Control Systems. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 3, pp. 90–98. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-90-98

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

Submitted 26.03.2023; accepted 28.04.2023; published online 29.06.2023

Introduction. Automatic evaluation of the air situation and information updates in automated command and control systems (ACCS) plays a pivotal role in ensuring the effectiveness of combat operations (as depicted in Fig. 1). The threat level of targets with respect to the protected object can be assessed based on target data from radar sources and higher-level information processing. These values are aggregated and filtered to serve as a crucial input parameter for target distribution requests and selection of appropriate combat means, enabling informed decision making using air defense systems [1, 2].

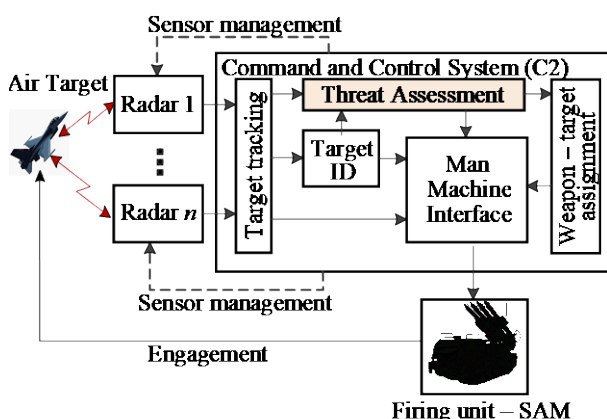


Fig. 1. Function overview of an ACCS

Automatic evaluation of the air situation is a continuous, real-time process that determines the threat value of targets to the protected objects. Calculating the threat value is a challenging task due to the need for high processing performance, information synthesis from multiple sources, and real-time requirements. The information used for situation assessment is frequently obtained from various heterogeneous, uncertain, and interfered sources [3, 4]. Therefore, to ensure reliability, it is necessary to employ estimation algorithms capable of inferring from incomplete or unreliable information sources. Currently, fuzzy logic and Bayesian probability networks are widely used for assessing the threat of air targets [5–9]. In this paper, considering the priority of real-time approaches, we develop a method for automatic target threat assessment based on fuzzy logic methods.

The threat value is evaluated based on the inference ability of fuzzy systems, including linguistic variables, fuzzy sets, fuzzy rules, defuzzification mechanisms, etc. The outstanding advantage of this method consists in its similarity with natu-

ral inference mechanisms, thus enabling users to participate in the design processing of inference systems and use their expert knowledge to propose suitable fuzzy rules. At the same time, the fuzzification process contributes to smoothing threat value variations at uncertainty boundaries.

Research methods.

Basic structure of a fuzzy model. The fuzzy set theory proposed by Lotfi A. Zadeh includes fuzzy logic, fuzzy arithmetic, fuzzy mathematical programming, fuzzy topological geometry, fuzzy graph theory, and fuzzy data analysis. This theory aims to introduce the concept of fuzzy sets. Mathematically, a fuzzy set A on a basic space X is defined as $A = \{[\mu_A(x)/x] | x \in X\}$. In which, $\mu_A(x)$ is a membership function that quantifies the degree to which elements x belong to the basic set X , expressed as: $\mu_A : X \rightarrow [0, 1]$.

The structure of a typical basic processing model conventionally includes an input, an output, and a processor. The processor is essentially a mapping that reflects the dependence of the output variables on the input variables in the system. In a fuzzy model, a certain numerical value can be taken as an input, a fuzzy set or an unambiguous numerical value can be taken as an output. The output–input mapping relationship of a fuzzy model is described by a set of fuzzy rules, rather than by an explicit function. As a rule, a general fuzzy model has numerous inputs and outputs. However, a multi-output model can always be divided into a set of single-output models. In this work, we consider the case of a multiple-input one-output system. Specifically, the basic structure of a fuzzy model consists of five components [10] (Fig. 2).

In Fig. 2, the rule set is a site where the IF–THEN fuzzy rules are stored. This is a set of

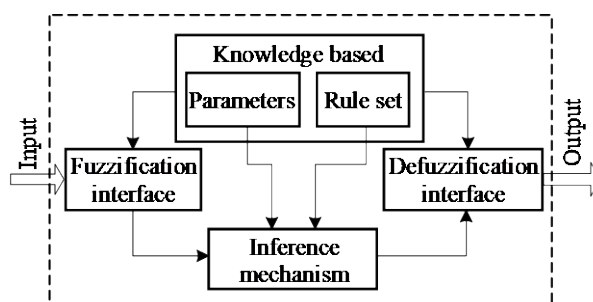


Fig. 2. Schematic diagram of the basic structure of a fuzzy model

statements or human-understandable rules, which describe the behavior of the system. With an n input–one output fuzzy model, each fuzzy rule can be described as follows:

$$r_{ij} : \text{IF} \left[(x_1 \text{ is } A_1^i) \text{AND} \dots \text{AND} (x_n \text{ is } A_n^i) \right] \\ \text{THEN} \left[(y \text{ is } B^j)(\omega_{ij}) \right],$$

where A_k^i with $k=1, \dots, n$ and B^j are the language values defined on the input and output variables of the model, respectively;

$$x_k \text{ is } A_k^i; k=1, \dots, n.$$

The hypothesis part of the rule is formed from the intersection (performed by fuzzy AND) between the linguistic statements, referred to as component premises. The conclusion of the rule is mapped from the hypothesis part by fuzzy inference (IF–THEN). Corresponding to each rule, there is a rule confidence $\omega_{ij} \in [0, 1]$. The reliability of the rule reflects the correctness of $\omega_{ij} = 0$, showing that the rule does not participate in determining the output of the model. Each rule base is a combination of fuzzy OR selection of all fuzzy rules. Rules can be formed from human expert knowledge or obtained from empirical samples. The rule base is the most important component of any fuzzy model.

The model parameter set specifies the shape of the membership function of the linguistic value used to represent fuzzy variables and fuzzy rules. The parameter values can be evaluated by either expert experience or knowledge mining process from an experiment. The rule base and the model parameter set are commonly referred to as the knowledge base. The reasoning mechanism is responsible for performing a fuzzy inference procedure based on the knowledge base and input values to give a predicted value at the output. The fuzzification interface performs the conversion of explicit inputs into degrees of belonging to language values. The defuzzification interface converts the fuzzy inference result into a clear output value.

Constructing a fuzzy model to assess the target threat level. The fuzzy model is constructed as a multiple-input one-output model, with the input data comprising the target trajectory information

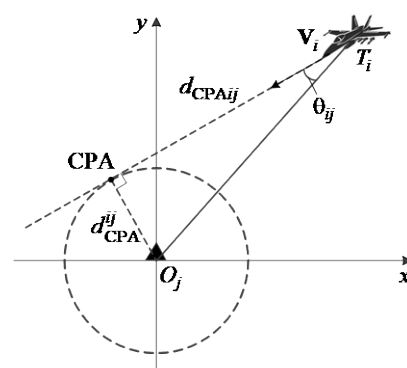


Fig. 3. Correlation diagram between the air target and the protected object

and the protected object information. The target trajectory information is obtained from processing and merging the data retrieved from the measuring system, including distance, speed, altitude, flight direction, etc. The protected object information includes position, scope, protected direction, etc. The correlation between the target T_i and the protected object O_j is illustrated in Fig 3.

The target trajectory information can be used to determine the vicinity of the target to the protected object, where the CPA distance of the target d_{CPA}^{ij} is the shortest distance to the protected object. The closest point of approach (CPA) is an important parameter for evaluating the target threat level. The target is especially dangerous when its CPA distance is equal to 0. In the case of n targets attacking m protected objects, the closest approach time parameter is calculated as follows:

$$T_{CPA}^{ij} = \frac{d_{CPA}^{ij}}{v_i}; \forall i=1, \dots, n; \forall j=1, \dots, m, \quad (1)$$

where d_{CPA}^{ij} is the distance from the target i to the CPA of the protected object j and v_i is the target velocity i . The value of the approaching flight direction θ_{ij} ranges within $[0^\circ, 180^\circ]$, determined through the azimuth and flight direction. When the target approaches the protected object, the approach flight direction ranges within $[0^\circ, 90^\circ]$. The larger the flight direction, the lower the threat level. A fuzzy model to evaluate the threat of a target is constructed following the steps outlined in Fig. 4.

Step 1. Based on the information about the target derived by radar sources and that about the

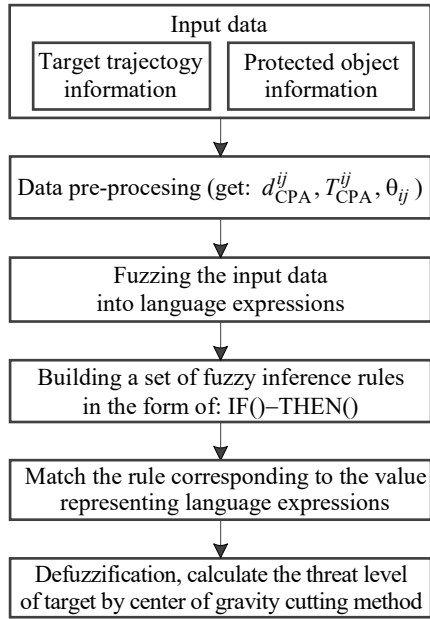


Fig. 4. Fuzzy model diagram to assess the target threat value protected objects provided by ACCS, the trajectory parameters of the target (position, speed, course, altitude, etc.) are used to determine the CPA distance d_{CPA}^{ij} of the target T_i relative to the protected object O_j , then to calculate the time T_{CPA}^{ij} according to (1). Thus, the input data and expressive language of the proposed fuzzy model are determined as shown in Tab. 1.

Step 2. Fuzzy input information is treated by assigning a membership level to the linguistic expression of the input information. The input clear values of the model are used as arguments to the membership functions that correspond to the lin-

Tab. 1. Input data and expressive language of the fuzzy model

Input data		Expressive language	
Index (n)	Parameter	Level (l)	Value
1	Distance	1	High (H)
2	Altitude	2	Medium (M)
3	Speed	3	Low (L)
4	CPA distance d_{CPA}^{ij}		
5	Flight direction θ_{ij}		
6	CPA time T_{CPA}^{ij}		

guistic value in the hypothesis part of each fuzzy rule. From [4], the target trajectory parameters are subdivided into different levels, e.g., the target altitude is divided into a small altitude (from 200 m to 1000 m); an average altitude (from 1000 m to 4000 m); a high altitude (over 4000 m). The target speed is divided into a small speed (<80 m/s); a subsonic (<300 m/s) speed; a high speed (<1500 m/s); a supersonic speed (>1500 m/s). Based on dividing the value of the target parameters, the membership functions are formed for each parameter, as shown in Fig. 5.

Step 3. A set of fuzzy inference rules is built in the form of IF–THEN by fuzzification of the input information into linguistic expressions. It can be seen that smaller target distances or its larger velocities correspond to higher threat values. Thus, the language of expressing threat levels based on input information is proportional to speed and inversely proportional to distance, altitude, flight parameters, and time to CPA point. The fuzzy inference rule set that evaluates the input information by the fuzzy operator AND, based on combining expert knowledge and the reliability of each

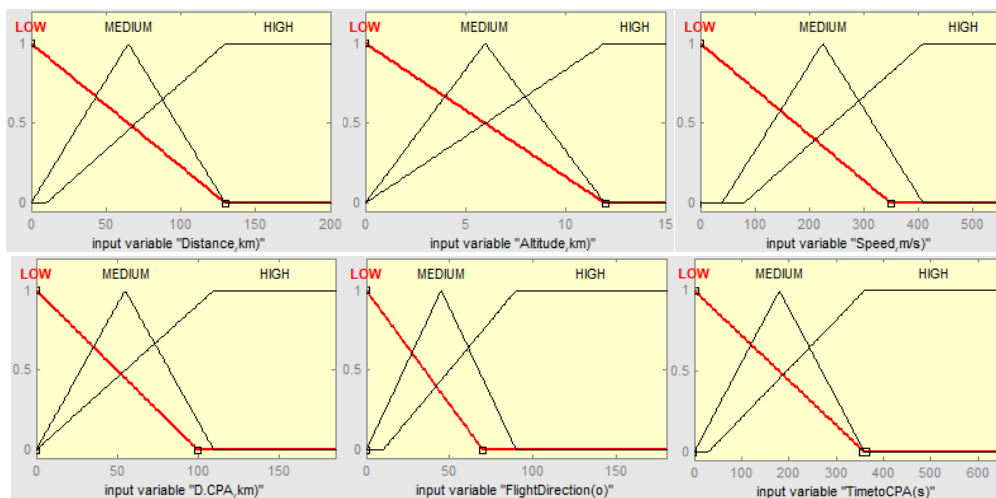


Fig. 5. Membership functions established based on expert knowledge

Tab. 2. Fuzzy inference rule set in the form of IF–THEN to evaluate input data by AND operator based on expert knowledge

No.	Reliability ω_i	AND						Target threat value
		Range, m	Altitude, m	Speed, m/s	Distance d_{CPA}^{ij} , m	Flight Direction $\theta_i, \dots^\circ$	Time to CPA T_{CPA}^{ij} , s	
1	1.0	L	L	H	L	L	L	H
2	1.0	H	H	L	H	H	H	L
3	1.0	M	M	M	M	M	M	M
4	0.5	H	L	H	L	L	M	M
5	0.5	M	L	H	L	L	M	H
6	0.5	L	H	M	H	H	H	L
7	0.1	H	H	M	L	L	H	H
8	0.1	M	M	H	M	L	M	M
9	0.1	L	L	L	L	L	H	L

rule, $\omega_i \in [0,1]$ is built as shown in Tab. 2.

Tab. 2 shows that each evaluation rule for determining the target threat value is the minimum value of the membership level of the fuzzy set for each input. According to Tab. 1, the linguistic expression l of the input information n is defined as nl and the relative degree of the target x is $\mu_{nl}(x)$, then the satisfaction H_k for each input clearly value vector is calculated as follows:

$$H_1 = \min\{\mu_{13}(x), \mu_{23}(x), \mu_{31}(x), \mu_{43}(x), \mu_{53}(x), \mu_{63}(x)\};$$

$$H_2 = \min\{\mu_{11}(x), \mu_{21}(x), \mu_{33}(x), \mu_{41}(x), \mu_{51}(x), \mu_{61}(x)\};$$

...

$$H_9 = \min\{\mu_{13}(x), \mu_{23}(x), \mu_{33}(x), \mu_{43}(x), \mu_{53}(x), \mu_{61}(x)\}.$$

Step 4. Each evaluation rule in Tab. 2 generates a satisfaction H_k . In case where all the rules in Tab. 2 are activated at the same time, there will be rules that produce the same satisfaction H_k . For example, rules 1, 5 and 7 generate the target threat level with the language expression High (H); rules 3, 4 and 8 generate the threat level with the language expression Medium (M); rules 2, 6, and 9 produce a hazard level with the language expression Low (L). Therefore, it is necessary to integrate the rules that produce the same linguistic expression of the threat level, using the fuzzy $\cup$ operator ProbOR according to the following formula:

$$\beta_l = \bigcup_{\forall k} H_k^l \omega_i,$$

where H_k^l is the satisfaction corresponding to a linguistic expression of threat level l ($l = 1$: High (H);

$l = 2$: Medium (M); $l = 3$: Low (L)). Then, for the rules in Tab. 2, their combined members are:

$$\beta_1 = H_1 \omega_1 + H_5 \omega_5 + H_7 \omega_7 - H_1 \omega_1 H_5 \omega_5 -$$

$$- H_5 \omega_5 H_7 \omega_7 - H_7 \omega_7 H_1 \omega_1 + H_1 \omega_1 H_5 \omega_5 H_7 \omega_7;$$

$$\beta_2 = H_3 \omega_3 + H_4 \omega_4 + H_8 \omega_8 - H_3 \omega_3 H_4 \omega_4 -$$

$$- H_4 \omega_4 H_8 \omega_8 - H_8 \omega_8 H_3 \omega_3 + H_3 \omega_3 H_4 \omega_4 H_8 \omega_8;$$

$$\beta_3 = H_2 \omega_2 + H_6 \omega_6 + H_9 \omega_9 - H_2 \omega_2 H_6 \omega_6 -$$

$$- H_6 \omega_6 H_9 \omega_9 - H_9 \omega_9 H_2 \omega_2 + H_2 \omega_2 H_6 \omega_6 H_9 \omega_9.$$

Step 5. Defuzzification and the target threat value is calculated using the Center of Gravity (CoG) method. CoG is the most prevalent and physically appealing of all the defuzzification methods [Sugeno, 1985, Lee 1990]. The membership function at the model output with three linguistic expressions (High, Medium, Low), corresponding to the target threat value is $v_n \in [0,1.0]$. To calculate a specific value, it is necessary to combine the relevant members ($\beta_1, \beta_2, \beta_3$) followed by its conversion to a scalar value, through a truncation to remove the uncertain components and the final form of the membership function $\mu_C(v_n)$ to the determined threat level.

This method returns a precise value depending on the CoG of the fuzzy set. The overall area of the membership function distribution is divided into a number of sub-areas (such as triangle, trapezoidal etc.) in Fig. 6. Let S_i and v_i denote the area and CoG of i -th sub-region. Where, $S_i = \int \mu_C(v) dv$ and n is the number of geometrical components. The threat value of the air target T_i to the protected object O_j is calculated as follows:

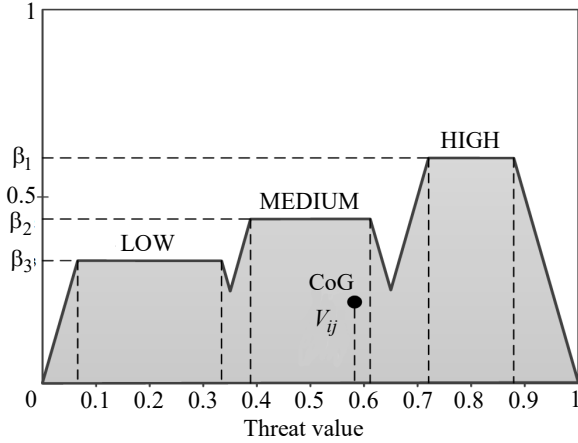


Fig. 6. Output membership function of the fuzzy model after clipping the center of gravity

$$V_{ij}^{CoG} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i v_i}{\sum_{i=1}^n S_i} = \frac{\int \mu_C(v) v dv}{\int \mu_C(v) dv}.$$

Simulation testing and result evaluation.

Input data. Fig. 7 depicts an air defense scenario used to test the proposed fuzzy model when evaluating and comparing the threat levels of different targets. This scenario simulates an air situation with 10 tracks ($T_1, T_2, \dots, T_{10}$) with different parameters and the protected object O . The horizontal axis Ox has a positive direction pointing to the East, and the vertical axis Oy pointing to the North.

The trajectory parameters of the targets at the testing time are presented in Tab. 3. Here, the CPA

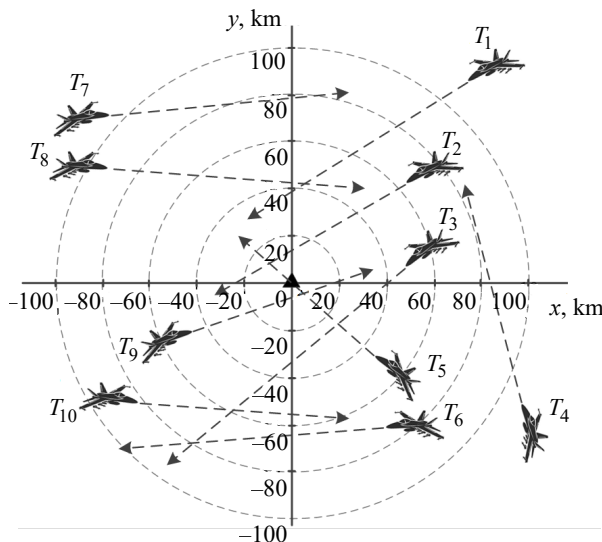


Fig. 7. Air defense scenario for evaluation testing of the proposed model

Tab. 3. Trajectory parameter details

Target, no.	Distance, km	Azimuth, deg	Altitude, m	Speed, m/s	Course, deg
T_1	134.40	43.5	4500	305.6	245.0
T_2	70.43	51.3	3200	250.0	250.0
T_3	54.92	79.5	5800	333.3	220.0
T_4	116.81	122.1	7300	244.4	350.0
T_5	56.57	135.0	9500	261.1	315.0
T_6	80.22	140.1	8200	241.7	265.0
T_7	114.02	307.9	5200	305.6	80.0
T_8	101.07	296.4	6200	319.4	95.0
T_9	59.42	247.8	2700	194.4	75.0
T_{10}	100.12	236.0	9140	216.7	105.0

distance d_{CPA}^{ij} , approach flight direction θ_{ij} and flight time T_{CPA}^{ij} of the target over the approach point are calculated by (1) based on pre-processing of the input data.

Simulation testing and result evaluation. Experiment 1. In the first test, to evaluate the accuracy of the proposed fuzzy model based on the Sugeno model and the proposed fuzzy rules in Tab. 2, we use the FIS Edition toolkit in MATLAB. Fuzzy rules are established according to the values of the input information (Fig. 8). Following the establishment of fuzzy rules, the Simulink toolkit in MATLAB is used to construct a fuzzy model for calculating the threat level of the targets in Tab. 3. The testing results of this model with the target trajectory parameters are presented in Fig. 10.

Experiment 2. To evaluate the computational performance of the proposed fuzzy model, we developed a BATE software testbed, which simulates the real-time ACCS. BATE is implemented in Microsoft Visual Studio C++, capable of simulating and displaying an air situation picture [11] on a digital map (Fig. 9). Then the calculation time complexity of the proposed method is estimated. We created various air defense scenarios with increasing complexity to calculate execution time.

Comments. According to Fig. 10, the threat value of target T_5 is the highest $V_{5j}=0.783$, the threat value of target T_7 is the lowest $V_{7j}=0.213$. From the calculation results of the threat value, it is possible to arrange the targets in terms of their threat levels from high to low, which is convenient for imple-

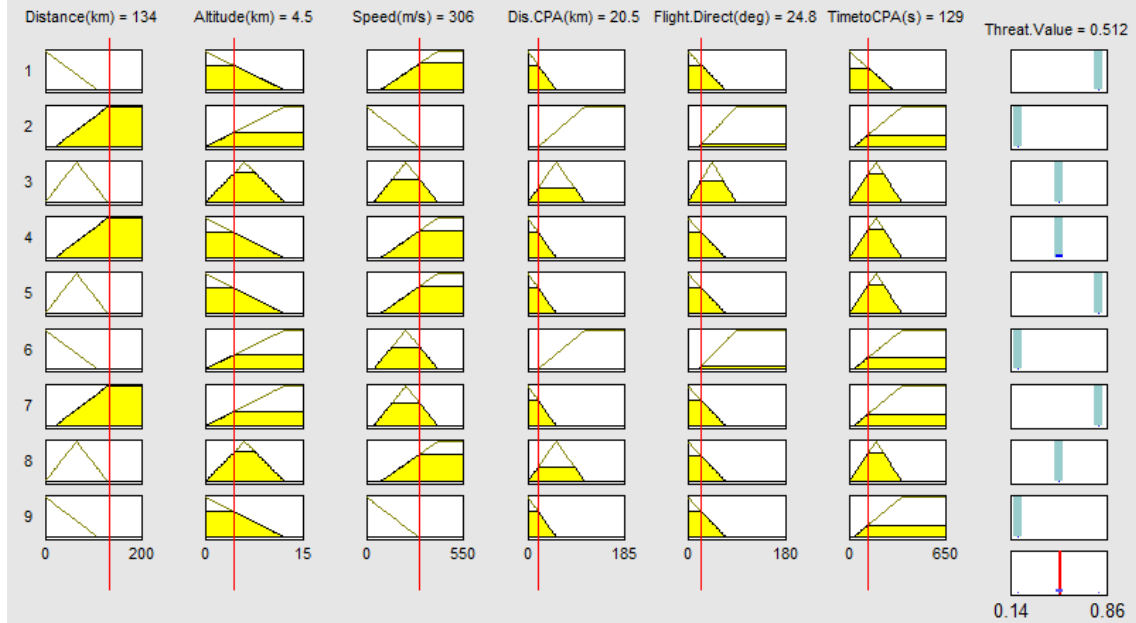


Fig. 8. Testing simulation of the proposed fuzzy model using the FIS EDITOR tool

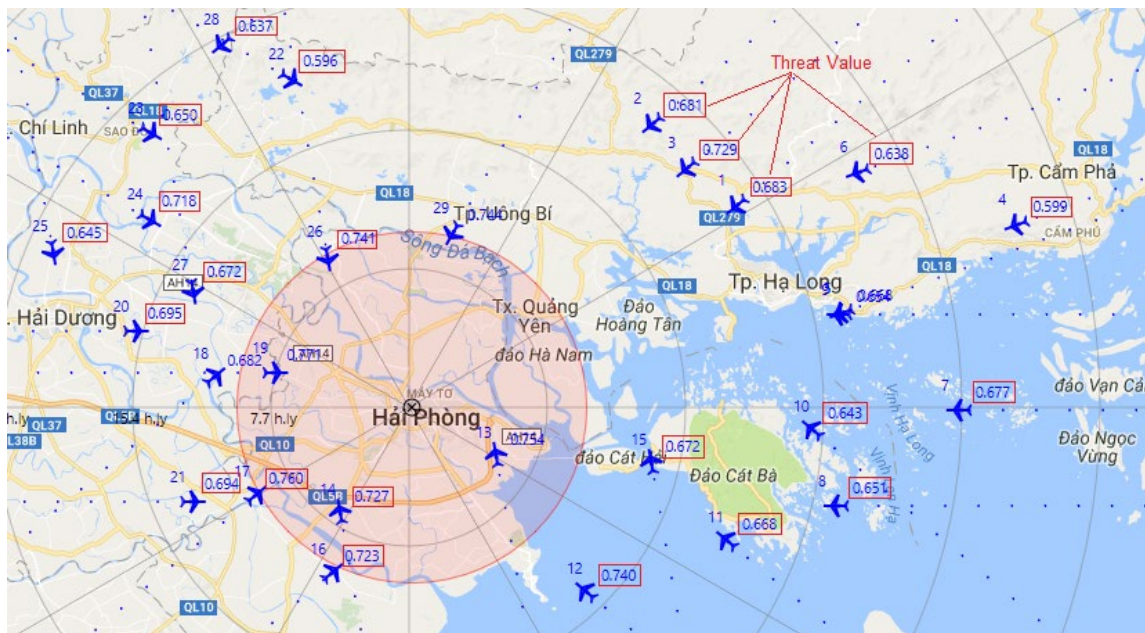


Fig. 9. Air defense scenario for evaluation testing of the proposed model

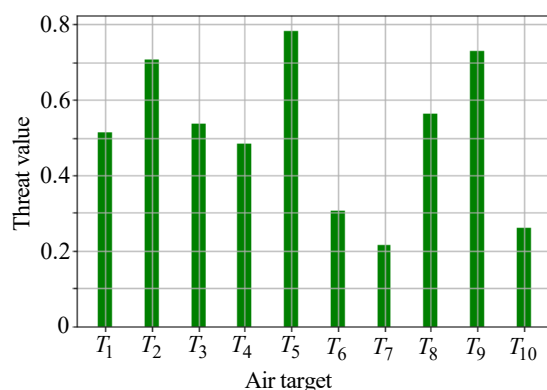


Fig. 10. Threat level values of the target in the testing of an air defense scenario

menting the function of automatically distributing the target data to firing units in an ACCS [12, 13].

Fig. 9 presents the proposed algorithm model calculated and updated for the threat values of dozens of targets in each data update cycle (less than 1 s) [14, 15]. The threat values are displayed directly on a digital map. This confirms that the proposed algorithm model can be applied in real-time ACCS.

Conclusion. This paper presents a method for solving the issue of calculating the threat value of air targets based on the fuzzy logic inference method. The proposed model utilizes the Sugeno fuzzy model, which features multiple inputs (target trajectory pa-

rameters) and a single output (target threat value). A fuzzy inference rule in the IF–THEN format is established to evaluate input information using the AND operator, incorporating expert knowledge. The fuzzy rules and defuzzification, implemented through the clipped center of gravity method, are combined to determine the clear threat value of a target.

The proposed fuzzy model was simulated and tested using MATLAB tools on a scenario involv-

ing 10 target trajectories with varying parameters. Additionally, the BATE software is used to test the model via different air defense scenarios. The testing results suggest that the proposed fuzzy model is capable of timely calculating the threat value of each target to the protected object, thus being suitable for developing tactical supporting software modules for real-time air defense command and control systems.

Author's contribution

Xuan Truong Nguyen, synthesize and analyze approaches to solving the threat assessment problem in automated command and control system; building and evaluating an algorithm model to calculate the threat value of the air target based on fuzzy model. Developing a testbed software BATE in Microsoft Visual Studio C++, that simulates the real-time automated command and control system.

Kim Phuong Phung, scientific support including: evaluating fuzzy algorithm model to calculate the threat value of the air target that can be applied in a real-time automated command and control system.

Quang Hieu Dang, scientific support including: programming the software module to display the air situation picture in Microsoft Visual Studio C++, simulation and evaluation of the results.

Xung Ha Vo, scientific support including: simulation model by the MATLAB and evaluation of results.

Hoa Tien Vu, scientific guidance, scientific consulting on mathematical models in the field of radar data processing; target tracking, guidance in conducting experimental studies.

References

1. Roux J. N., Van Vuuren J. H. Threat Evaluation and Weapon Assignment Decision Support: A Review of the State of the Art. *ORiON*. 2007, vol. 23, no. 2, pp. 151–187. doi: 10.5784/23-2-54
2. Pavlovskii A. V. *Osnovy teorii upravleniya ognem. (Sistemnyi analiz. Teoriya prinyatiya reshenii. Teoriya effektivnosti)* [Fundamentals of the Theory of Fire Control. (System Analysis. Decision Theory. Efficiency Theory)]. Smolensk, *AV VPVO VS RF*, 2016, 234 p. (In Russ.)
3. Lyaskovskii V. L. *Osnovy proektirovaniya i ekspluatatsii avtomatizirovannykh sistem upravleniya voennogo naznacheniya* [Fundamentals of Design and Operation of Automated Control Systems for Military Purposes]. Moscow, *Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Bauman*, 2016, 188 p. (In Russ.)
4. Liplianin A. Yu., Shein A. S., Khizhniak A. V. Method of Accounting Importance of the Goal in Task of Aircraft Distribution Between Firepower. *Doklady BGUIR*. 2017, no. 2, pp. 77–83. (In Russ.)
5. Johansson F. Evaluating the Performance of TEWA Systems. Orebro University, Intellecta Infolog, Kallered, 2010, 201 p.
6. Dongfeng Ch., Yu F., Yongxue L. Threat Assessment for Air Defense Operations Based on Intuitionistic Fuzzy Logic. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 29, pp. 3302–3306. doi: 10.1016/j.proeng.2012.01.484
7. Johansson F., Falkman G. A Bayesian Network Approach to Threat Evaluation with Application to an Air Defense Scenario. 11th Intern. Conf. on Information Fusion. Cologne, Germany, 30 June 2008–03 July 2008. IEEE, 2008, pp. 1352–1358.
8. Yang Haiyan, Han Cheng, Tu Congliang. Air Targets Threat Assessment Based on BP-BN. *J. of Communications*. 2018, vol. 13, no. 1, pp. 21–26. doi: 10.12720/jcm.13.1.21-26
9. Sushil Kumar, Bipin Kumar Tripathi. Modelling of Threat Evaluation for Dynamic Targets Using Bayesian Network Approach. *Procedia Technology*. 2016, vol. 24, pp. 1268–1275.
10. Li-Xin Wang. *A Course in Fuzzy Systems and Control*. Prentice Hall, 1997, 424 p.
11. Shynar E., Degen U. Methods and Concepts for Air Situation Picture Generation. Proc. of the Third Intern. Conf. on Information Fusion, Paris, France, 10–13 July 2000. IEEE, 2000. doi: 10.1109/IFIC.2000.862455
12. Hasan M. B., Barua Ya. Weapon Target Assignment. 2020. doi: 10.5772/intechopen.93665
13. Johansson F., Falkman G. Real-Time Allocation of Defensive Resources to Rockets, Artillery, and Mortars. 3th Conf. on Information Fusion (FUSION). Edinburgh, UK. 26–29 July 2010. IEEE, 2010. doi: 10.1109/ICIF.2010.5712026
14. Fedyaev V. N. *Teoreticheskie osnovy avtomatizirovannogo upravleniya* [Theoretical Foundations of Automated Control]. Tver', *VA VKO*, 2007, 204 p. (In Russ.)
15. Roux J. N., van Vuuren J. H. Real-Time Threat Evaluation in a Ground Based Air Defence Environment. *ORiON*. 2008, vol. 24, no. 1, pp. 75–101. doi: 10.5784/24-1-60

Information about the author

Xuan Truong Nguyen, Master's degree in "Radar Engineering" (2013) of the Russian Federation Armed Forces Army Air Defence Military Academy named after Marshal of the Soviet Union A. M. Vasilevsky. Postgraduate student, Researcher of Institute of System Integration / Le Quy Don Technical University. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: radar and radio navigation; telecommunications.

Address: Le Quy Don Technical University, 236, Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam

E-mail: truongnx.isi@lqdtu.edu.vn

Kim Phuong Phung, Master's degree in "Computer science " (2014) of the Military Academy of Air and Space Defence named after Marshal of the Soviet Union G. K. Zhukov. Postgraduate student, Lecturer of the Department of Electronic Technologies of Institute of System Integration/Le Quy Don Technical University. The author of 3 scientific publications. Area of expertise: electronic technology; computer science.

Address: Le Quy Don Technical University, 236, Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam

E-mail: phuongpk.isi@lqdtu.edu.vn

Dang Quang Hieu, PhD (2022), Senior Researcher of the Institute of System Integration/ Le Quy Don Technical University. The author of 7 scientific publications. Area of expertise: radar and radio navigation; telecommunications.

Address: Le Quy Don Technical University, 236, Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam

E-mail: Hieudq@lqdtu.edu.vn

Xung Ha Vo, Master's degree in "Radar System Engineering" (Le Quy Don Technical University (LQDTU), Vietnam, 2007), PhD student in "Radar Systems Engineering". Head of System and Antenna Design/National Institute of Science and Technology. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: system engineering; radar data processing; control and automation.

Address: National Institute of Science and Technology, 17, Hoang Sam Str. Cay Giay, Hanoi, Vietnam

E-mail: voxungha@amst.edu.vn

Vu Hoa Tien, PhD in "Radio Electronica and Control Automation" (2005), Associate Professor (2014), Visiting Lecturer of Department of Aerospace Control Systems; a specialist in systems engineering control and automation. Author of 57 publications. Area of expertise: systems automatic control for UAV; electronic technology, systems engineering.

Address: Le Quy Don Technical University, 236, Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam

E-mail: hoatien57@lqdtu.edu.vn

О верификации измерений скорости поверхностных течений когерентным радаром СВЧ-диапазона с помощью дрейфтеров

И. Г. Горбунов^{1✉}, В. И. Веремьев¹, В. Д. Шестак¹,
Г. В. Комаров¹, С. А. Мысленков^{2,3}, К. П. Сильвестрова²

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

² Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

³ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

✉ gor-ig@mail.ru

Аннотация

Введение. Традиционные контактные средства измерений гидрографических параметров зачастую не обеспечивают необходимую оперативность получаемых данных для решения задач мониторинга акваторий. Перспективным направлением является применение когерентных радаров, позволяющих непосредственно измерять скорости поверхностных течений.

Цель работы. Оценка достоверности результатов измерений приповерхностной скорости течения доплеровским радаром сравнением с данными дрейфтеров.

Материалы и методы. В июне 2022 г. был проведен эксперимент по прибрежной оперативной океанографии в Черном море на акватории гидрофизического полигона "Геленджик" Южного отделения Института океанологии РАН с использованием доплеровского радара. Скорость течения измерялась когерентизированным навигационным радиолокатором сантиметрового диапазона с цифровой обработкой, установленным на научно-исследовательском судне "Ашамба", одновременно с дрейфтерными экспериментами с использованием лагранжевых дрейфтеров приповерхностного слоя с подводным парусом высотой 0.5 м, с передачей координат по мобильной связи. Данные дрейфтеров о скорости и направлении течения использовались для верификации радарных измерений. Измерения проводились с борта научно-исследовательского судна на малом ходу на различном расстоянии от берега, вблизи дрейфтеров. В процессе измерений осуществлялась запись треков судна и дрейфтеров. Обработка данных радиолокатора основана на исследовании спектральных характеристик отраженного сигнала, позволяющих оценивать динамические процессы на морской поверхности.

Результаты. По результатам обработки доплеровских спектров были получены радиальные составляющие скорости приповерхностных течений, далее было выполнено сопоставление скорости течений по данным дрейфтеров и данным радиолокации.

Заключение. Настоящая работа является определенным шагом в усовершенствовании методов измерений поверхностных течений с борта движущегося судна доплеровским радаром. Результаты верификации подтверждают пригодность аппаратно-программной части радара и алгоритмов обработки сигнала для измерения течений. Данные радиолокационных измерений хорошо согласуются с данными дрейфтеров в диапазоне скоростей от 15 см/с.

Ключевые слова: когерентный радар, СВЧ, доплеровский спектр, скорость течения, дрейфтеры, гидрофизический полигон

Для цитирования: О верификации измерений скорости поверхностных течений когерентным радаром СВЧ-диапазона с помощью дрейфтеров / И. Г. Горбунов, В. И. Веремьев, В. Д. Шестак, Г. В. Комаров, С. А. Мысленков, К. П. Сильвестрова // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 3. С. 99–110. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-99-110

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Радиолокационные измерения выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 21-79-10375. <https://rscf.ru/project/21-79-10375/>
Работа Сильвестровой К. П. выполнялась в рамках темы Госзадания № FMWE-2021-0002.

Благодарности. Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН А. Г. Зацепину, В. А. Телегину, С. Б. Куклеву, В. И. Баранову, В. В. Очереднику за их неоценимый вклад в организацию и постановку эксперимента.

Статья поступила в редакцию 03.02.2023; принята к публикации после рецензирования 18.05.2023; опубликована онлайн 29.06.2023



Verifying Measurements of Surface Current Velocities by X-Band Coherent Radar Using Drifter Data

Igor G. Gorbunov¹✉, Vladimir I. Veremyev¹, Vadim D. Shestak¹,
Gleb V. Komarov¹, Stanislav A. Myslenkov^{2,3}, Ksenia P. Silvestrova²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

✉ gor-ig@mail.ru

Abstract

Introduction. Conventional contact measurements of hydrographic parameters frequently fail to provide the necessary accuracy of data in the field of water area monitoring. This problem can be solved using coherent radars enabling direct measurements of surface current velocities.

Aim. To establish the accuracy of surface current velocities measured by a Doppler radar using drifter data.

Materials and methods. In June 2022, coastal operational oceanography studies were conducted at the hydrophysical test site of the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences in the Black Sea near Gelendzhik. Measurements were carried out using a coherent X-band radar installed on the Ashamba research vessel simultaneously with drifter experiments using Lagrangian drifters of the near-surface layer with an underwater 0.5 m sail. Coordinates were transmitted via mobile communication. The drifter data on the current velocity and direction were used to verify radar measurements. Measurements were taken onboard of the research vessel at a low speed and different distances from the shore, near the drifters. The tracks of the vessel and drifters were recorded simultaneously. Processing of the radar data involved obtaining Doppler spectra of signals to estimate the dynamic processes on the sea surface, including the current velocity.

Results. Radial components of the near-surface current velocity were calculated. Then, the current velocity values obtained based on the drifter and radar data were compared.

Conclusion. The present work makes a contribution to the advancement of methods for measuring surface currents from the board of a moving ship by Doppler radars. The obtained results confirm the suitability of the radar hardware and software and signal processing algorithms for measuring currents. The radar measurement data were found agree well with drifter data in the velocity range from 15 cm/s.

Keywords: coherent radar, X-band, Doppler spectra, current velocity, drifters, hydrophysical test site

For citation: Gorbunov I. G., Veremyev V. I., Shestak V. D., Komarov G. V., Myslenkov S. A., Silvestrova K. P. Verifying Measurements of Surface Current Velocities by X-Band Coherent Radar Using Drifter Data. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 3, pp. 99–110. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-99-110

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

Acknowledgements. This work was supported by Russian Science Foundation grant no. 21-79-10375. Work of K. P. Silvestrova was financed by "Goszadanie", grant no. FMWE-2021-0002. <https://rscf.ru/project/21-79-10375/>

The authors are grateful to colleagues from P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS: A. G. Zatsepin, V. A. Telegin, S. B. Kuklev, V. I. Baranov, V. V. Ocherednik for their invaluable contribution to organizing of the experiment.

Submitted 03.02.2023; accepted 18.05.2023; published online 29.06.2023

Введение. Радиолокационные дистанционные методы и средства контроля гидрографических параметров широко используются во многих странах на протяжении нескольких десятилетий. Традиционные контактные средства измерений в акваториях со значительной изменчивостью гид-

родинамических процессов и ветрового режима, с изменяющимся рельефом дна не обеспечивают необходимую оперативность получаемых данных для решения задач мониторинга акваторий [1, 2].

Широко применяющиеся в океанографии доплеровские радары коротковолнового (КВ)

диапазона (Sea Sonde, CODAR, США; WERA, Helzel Messtechnik GmbH, Германия) с рабочей частотой 3...40 МГц позволяют измерять скорость поверхностных течений, ветровое волнение в прибрежных районах океана и внутренних морей, предупреждать о приближении цунами, контролировать последствия аварийных ситуаций в местах нефтяных разливов [3]. Однако системы КВ-диапазона имеют низкое разрешение по дальности (сотни метров и даже километры) и азимуту (5...10°) и большое время обработки сигнала, составляющее десятки минут, поэтому для прибрежной оперативной океанографии целесообразно применение наряду с КВ-радаром сверхвысокочастотных (СВЧ) радаров, как правило, Х-диапазона. Эти радары обладают высоким разрешением по дальности и азимуту, малым временем обработки сигнала, могут быть легко размещены на судах, что позволяет вести мониторинг морской поверхности в ходе мореплавания.

Применяемые в океанографии СВЧ-радары в основном являются некогерентными. В России океанографические исследования с помощью некогерентных навигационных радаров проводились Институтом океанологии ИО РАН на гидрофизическом полигоне на побережье Черного моря в Геленджике [2–5], в Северной Атлантике и в Арктике [6], коллективом СПбГЭТУ "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) в акватории Финского залива в рамках международного проекта HYMNE [1, 7].

Преимуществом перед некогерентными радаром обладают когерентные, позволяющие непосредственно измерять доплеровскую частоту отраженного радиолокационного сигнала. Применение когерентного СВЧ-локатора позволяет в реальном времени получать информацию о динамических характеристиках морской поверхности: направлении и скорости поверхностных течений, ветра, высоте морских волн с использованием эффекта Доплера [8, 9]. Создание когерентных доплеровских локаторов для использования исключительно в океанографических целях на сегодняшний день представляется нецелесообразным по экономическим соображениям, выходом является доработка навигационного некогерентного радара.

Коллектив СПбГЭТУ "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) имеет опыт разработки когерентизированных радаров и многолетнего сотрудничества с исследовательским центром GKSS (HZG), Германия, в области радиолокационной гидрографии с их использованием [10, 11].

Псевдокогерентный локатор на основе навигационного радара Х-диапазона "Furuno" создан в НИИ "Прогноз" СПбГЭТУ "ЛЭТИ". С помощью этого радара были проведены успешные измерения параметров морского волнения на гидрофизическом полигоне ИО РАН на побережье Черного моря с береговой линии [12, 13]. Известен также пример применения когерентного СВЧ-радар разработки НПО "Микран" (Томск) для измерений скорости морских течений со стационарной позиции [14]. Опыт использования в России когерентных локаторов Х-диапазона для измерений с подвижного носителя авторам неизвестен.

В ходе эксперимента по прибрежной оперативной океанографии в Черном море на акватории гидрофизического полигона "Геленджик" ИО РАН в июне 2022 г. были измерены скорости приповерхностного течения и характеристики поверхностного волнения радиолокатором НИИ "Прогноз", расположенным на борту малого научно-исследовательского судна (МНИС) "Ашамба". Для верификации результатов, полученных радаром, измерения проводились одновременно с дрейферными экспериментами МГУ и ИО РАН с использованием GPS-ГЛОНАСС лагранжевых дрейфтеров приповерхностного слоя [15–17] с передачей координат по мобильной связи. Цель настоящей статьи – представить результаты измерений скорости течения доплеровским СВЧ-радиолокатором на движущемся судне и оценить качество прямых измерений скорости течения по данным дрейфтеров.

Оборудование и методика эксперимента.

Для радиолокационных доплеровских измерений приповерхностной скорости течения использовался когерентизированный доплеровский радар на основе навигационной РЛС трехсантиметрового диапазона Furuno 1623, созданный силами НИИ "Прогноз" (рис. 1).

Когерентность радара обеспечивается разделением опорного и информационного сигнала.

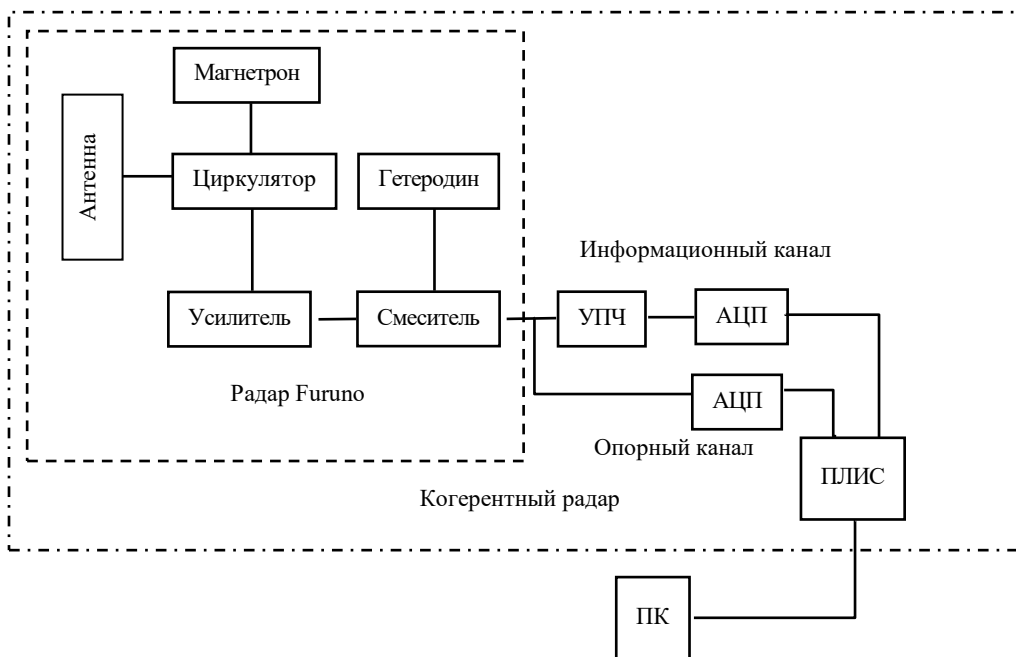


Рис. 1. Структурная схема когерентизированного радара НИИ "Прогноз"

Fig. 1. Block scheme of a coherent radar developed by the Prognos research organization

ла, усиленного дополнительным усилителем промежуточной частоты УПЧ, и оцифровкой их на промежуточной частоте с формированием цифровых квадратур после блоков аналого-цифровых преобразователей АЦП и когерентной обработкой сигнала в программируемой логической интегральной схеме ПЛИС и персональном компьютере ПК. Характеристики радара приведены в таблице.

В ходе измерений радар располагался на борту МНИС ИО РАН "Ашамба". Эксперимент проводился в участке акватории полигона между Геленджикской бухтой и поселком Дивноморское.

Для планирования радарного эксперимента и последующей верификации использовались лагранжевы дрейфтеры. Радарные измерения проводились одновременно с дрейфтерными экспериментами МГУ и ИО РАН. Дрейфтеры были оснащены подводным парусом высотой 0.5 м, расположенным в приповерхностном горизонте, что позволяло сравнивать полученные

данные с данными радаров для поверхностного слоя. Дискретность измерений по времени для дрейфтеров составляла 2 мин. Достоинством дрейфтеров является возможность отслеживания течений даже с очень маленькими скоростями: 2...5 см/с [17].

Схема проведения радарного эксперимента выглядела следующим образом: сначала выпускались дрейфтеры, оценивались скорость и направление течения, а затем проводилась съемка радаром вблизи дрейфтеров (на расстоянии 100...300 м). Радиолокационные измерения проводились с борта судна на малом ходу на различном расстоянии от берега, по возможности, вблизи спущенных дрейфтеров для последующей верификации измерений. Скорость хода МНИС "Ашамба" во время экспериментов составляла 3...6 уз. Антенна радара устанавливалась неподвижно, направление радиолокационного зондирования совпадало с курсом судна, который, по возможности, был сонаправлен наблюдаемому

Характеристики радара

Radar parameters

Параметр	Значение
Рабочая частота/длина волны	9420 МГц/3.2 см
Импульсная мощность передатчика	2 кВт
Разрешающая способность по дальности	12.5 и 45 м
Частота повторения импульсов	1200 и 3000 Гц
Поляризация антенны	Вертикальная
Ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости	1.8°

течению. Производились последовательные записи сигнала длительностью по 120 с.

Во время эксперимента наблюдалось слабое нерегулярное волнение при слабом ветре. В этих условиях уровень отраженного сигнала очень мал, поэтому радар во время измерений работал в режиме "длинного" зондирующего импульса с параметрами: длительность импульса 330 нс, частота повторения 1200 Гц, что позволило несколько повысить энергетику принимаемого сигнала.

Обработка данных радиолокационных измерений. Компьютерная обработка радиолокационных данных производилась в средах MATLAB и LabView. Алгоритм обработки включал в себя предварительное когерентное накопление сигнала, устранение низкочастотного тренда фильтром нижних частот и фильтрацию верхних частот для согласования с полосой обрабатываемого сигнала. Данные взвешивались окном Хемминга, подвергались процедуре дискретного преобразования Фурье размерностью 512, что соответствовало времени накопления сигнала около 0.5 с и обеспечило разрешающую способность по скорости около 3 см/с. Исследование данных показало, что увеличение времени накопления нецелесообразно ввиду разрушения когерентности сигнала, отраженного от разных участков морской поверхности, в условиях хода судна и нерегулярного волнения. Данные дополнительно сглаживались в скользящем окне на 5 отсчетов. На дальнейших шагах алгоритма производилась двухпороговая обработка сигнала с целью устранения шумов и помех большой амплитуды, нахождение первого момента полученного спектра.

Метод вычисления радиальной компоненты скорости течения основан на исследовании доплеровских спектров сигнала (ДСС) [18, 19].

Общий доплеровский сдвиг спектра отраженного сигнала F_D складывается из частотных компонент, обусловленных радиальной составляющей скорости течения f_r , собственной скоростью судна f_v и детерминированной составляющей ДСС f_d :

$$F_D = f_r + f_v + f_d.$$

Детерминированная составляющая ДСС возникает за счет резонансного рассеяния радиоволн на элементах морской поверхности, сравнимых по размерам с длиной волны зондирующего сигнала [18, 20]. В [11, 19] приведены примеры измерения радиальной скорости течения когерентным радаром без учета детерминированной составляющей. В описываемом исследовании учитывался вклад детерминированной составляющей ДСС в общий доплеровский сдвиг спектра сигнала. Предварительно можно отметить улучшение адекватности результатов при таком подходе, так как без учета детерминированной составляющей абсолютные значения скоростей представляются завышенными.

Детерминированная составляющая ДСС по частоте определяется согласно дисперсионному соотношению для "глубокой" воды [21]:

$$f_d = \sqrt{gK_B + \frac{\sigma_B}{\rho_B} K_B^3} / (2\pi),$$

где g – гравитационная постоянная; σ_B – поверхностное натяжение на границе "воздух – морская вода"; ρ_B – плотность морской воды; волновое число $K_B = 2\pi/\Lambda_B$, причем

$$\Lambda_B = \lambda / (2 \cos \theta_c).$$

Здесь λ – длина радиоволны (3.2 см); θ_c – угол скольжения радиолокационного луча.

Как показано в [20], по результатам расчетов и моделирования, положение основного максимума детерминированной составляющей ДСС по частоте при малых углах скольжения составляет 15.6 Гц для случаев малого волнения со среднеквадратическим отклонением (СКО) ординат морской поверхности 0.025 и 0.1 м.

ДСС по частоте пересчитываются в спектры доплеровской скорости по известной формуле

$$V_D = \frac{\lambda}{2 \cos \theta_c} F_D. \quad (1)$$

Радиальная составляющая скорости течения V_r получается после вычитания из доплеровской скорости V_D (1) собственной скорости V_v и детерминированной составляющей ДСС V_d .

Данные по скорости усредняются на интервале 20 с, что соответствует длине отрезка, проходимого судном, в среднем около 50 м, т. е. прибли-

тельно элементу разрешения радара по дальности (45 м) и затем на двухминутном отрезке.

Результаты радиолокационных измерений. Практическая максимальная дальность измерений составила 200...270 м.

Типичный частотный спектр сигнала, отраженного от морской поверхности, полученного на ходу судна при зондировании по курсу, показан на рис. 2.

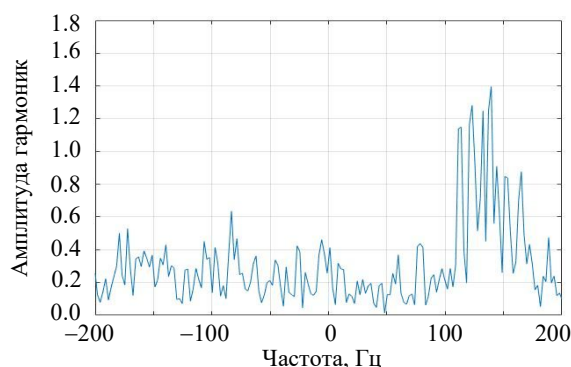


Рис. 2. Мгновенный доплеровский спектр сигнала от морской поверхности

Fig. 2. Instantaneous Doppler spectrum of a signal from the sea surface

Пример спектра сигнала после обработки приведен на рис. 3. Доплеровская частота спектра пересчитана в скорость по (1), вычтены собственная скорость и детерминированная составляющая ДСС. Ось абсцисс отградуирована в сантиметрах в секунду, по оси ординат – безразмерная амплитуда гармоник. Время накопления сигнала 0.5 с. Расположение максимума спектра (рис. 3) соответствует значению радиальной компоненты скорости течения, в данном случае – около 27 см/с. Отрицательный знак скорости свидетельствует о том, что направление течения противоположно ходу судна.

Измеренные радиальные составляющие скорости течения на разных участках трека судна при усреднении на интервале 20 с со-

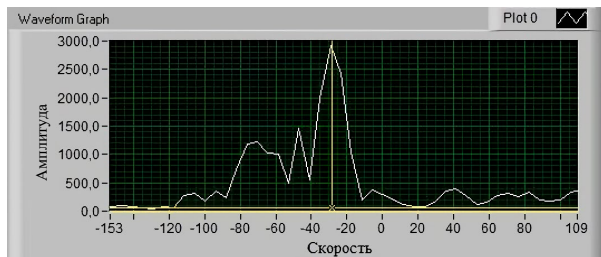


Рис. 3. Доплеровский спектр радиальной составляющей скорости течения

Fig. 3. Doppler spectrum of the radial component of current velocity

ставляли от 15 до 60 см/с со среднеквадратическим отклонением измерений 13 %. При усреднении на двухминутном интервале получены значения скоростей от 20 до 50 см/с с СКО измерений 10 %. Для меньших скоростей течений (15...20 см/с по данным радара) СКО составило более 40 % (около 8 см/с), что сравнимо с самими измеряемыми значениями. Такие значения были измерены от расстояния 6.2 км и ближе к берегу (ближние к берегу оранжевые треугольники на рис. 4). При удалении более 6.2 км измеренные скорости опять возрастали до 0.4...0.5 м/с. К сожалению, для этого участка нет данных дрейфтеров.

Малые радиальные скорости течений (менее 10...15 см/с), наблюдавшиеся согласно данным дрейфтеров, измерить в условиях эксперимента не удалось ввиду больших флуктуаций спектра сигнала морской поверхности, составляющих несколько десятков герц (рис. 2).

Результаты сопоставления радиолокационных измерений с данными дрейфтеров. Было выпущено 10 дрейфтеров парами, с парусами на глубине 0...0.5 м в районе Геленджик–Дивноморск. Радиолокационные измерения проводились до и после выпуска дрейфтеров с покрытием участка морской поверхности, в котором находилась пара дрейфтеров. К сожалению, ввиду ряда технических причин радиолокационными измерениями был охвачен достаточно небольшой участок акватории (рис. 4). Существенных различий траекторий дрейфтеров и скорости течения в точках радарных измерений не наблюдалось. Синими стрелками (рис. 4) показаны векторы скорости течения, измеренные радаром, оранжевыми стрелками – дрейфтерами.

Однопозиционный радар измеряет только радиальную компоненту скорости, для получения истинного вектора течения необходима работа двух радаров на разных позициях. В данном случае измеренная радаром абсолютная скорость течения вычисляется по данным дрейфтеров по формуле

$$V = \frac{V_r}{\cos \Phi},$$

где V_r – радиальная компонента; Φ – угол между истинным направлением течения по данным дрейфтеров и курсом судна. Направле-

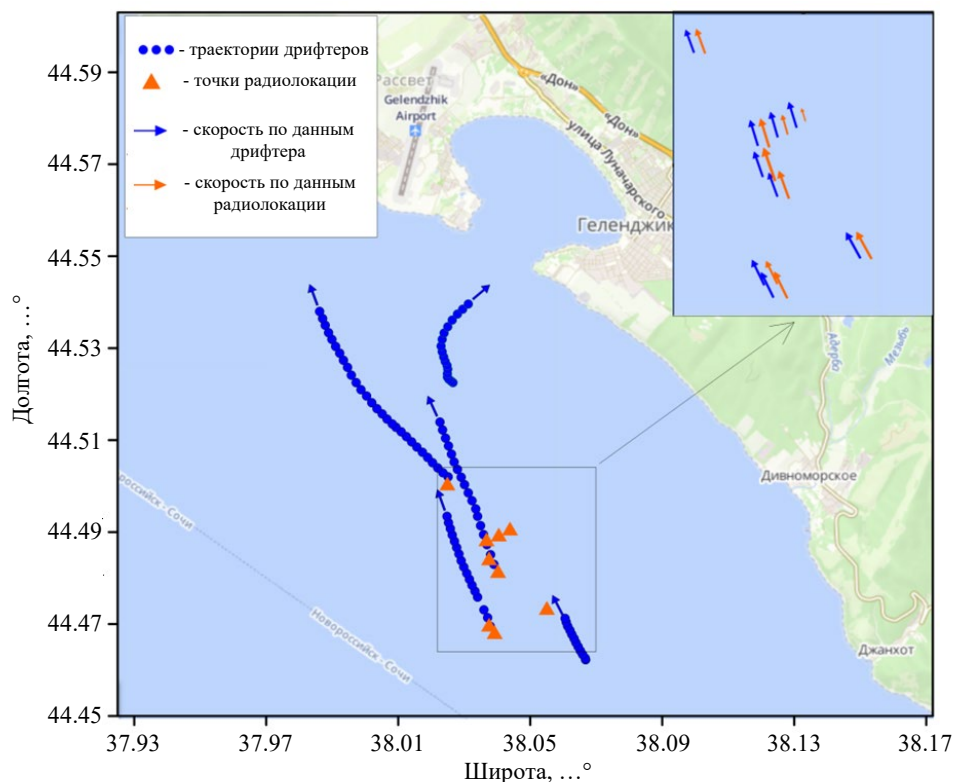


Рис. 4. Скорости течения по данным радара и дрейфтеров
Fig. 4. Current velocity according to the radar and drifters data

ние стрелок на врезке рис. 4 соответствует истинному направлению течения, длина – измеренной скорости.

Среднеквадратическая ошибка радарных измерений относительно дрейферных составила 5.9 см/с для скоростей течения 20...50 см/с. Систематическая ошибка измерений отсутствует. Коэффициент корреляции по всем измерениям 0.86.

Заключение. Описанное исследование является определенным шагом в разработке методики радиолокационных измерений поверхностных течений с борта движущегося судна.

В целом результаты верификации подтверждают пригодность аппаратно-программной части радара и примененных методов обработки сигнала для измерения радиальных скоростей течений, что свидетельствует о перспективности применения когерентизированного СВЧ-радара для целей оперативного мониторинга морской поверхности. В проведенном эксперименте наблюдается достаточно хорошая корреляция данных радара с данными дрейфтеров для скоростей течений от 15 см/с. Высокое разрешение и оперативность обработки данных

позволяют построить достаточно подробную картину поля радиальных скоростей течений.

Наряду с этим выявлен ряд ограничений оборудования и метода при измерениях с движущегося судна. Так, например, при малых углах скольжения, зависящих от высоты антенны радара, и слабом волнении удельная эффективная площадь рассеяния (ЭПР) морской поверхности стремится к нулю [22] и низкий уровень отраженного сигнала ограничивает практическую дальность измерений 200...300 м. Высота установки антенны ограничена особенностями судовой конструкции. Целесообразно применение радара при высоте волны, большей 0.5 м. Тогда с ростом удельной ЭПР морской поверхности максимальная дальность может составлять несколько сотен метров.

Измерение малых скоростей течения (менее 15 см/с) при движении судна также затруднительно, поскольку ширина флуктуаций спектров сигнала может составлять несколько десятков герц (см. рис. 2), очевидно, ввиду попадания большого количества случайно движущихся отражателей в элемент разрешения по площади. В результате переноса спектра в око-

лонулевую область частот после вычитания спектрального сдвига, соответствующего собственной скорости, спектральные составляющие, соответствующие малым скоростям течения, сосредоточены около нуля и перекрываются флуктуациями. Вопрос повышения разрешения по частоте и компенсации больших флуктуаций спектра сигнала для измерения малых доплеровских сдвигов в условиях движущегося судна требует дальнейшего теоретического и экспериментального исследования.

Направление радиолокационного зондирования в части экспериментов совпадало с направлением хода судна, в нескольких экспериментах направление было поперечным, под углом 90° к курсу. Значительного различия в характере спектров сигнала не обнаружено. Очевидно, существенно большее влияние на радиолокационное отражение должно иметь направление зондиро-

вания относительно генерального направления распространения морских волн.

Методика проведения последующих экспериментов должна предусматривать направление зондирования вдоль направления распространения волн, т. е. "поперек" гребней. При этом возрастает амплитуда и доплеровская информативность отраженного сигнала. Кроме того, скорость судна в эксперименте была достаточно велика, как правило, не менее 4 уз. Представляется необходимым во время эксперимента двигаться на скоростях не более 2...3 уз для уменьшения флуктуаций, возникающих за счет движения судна. Разумеется, выполнение этих требований ограничивается погодными условиями и характеристиками судна.

Результаты исследования будут использованы при дальнейшем развитии темы измерений гидрографических параметров когерентными радаром СВЧ-диапазона.

Авторский вклад

Горбунов Игорь Геннадьевич – подготовка статьи; проведение экспериментальных и теоретических исследований.

Веремьев Владимир Иванович – руководство научными исследованиями; обсуждение результатов.

Шестак Вадим Дмитриевич – программная реализация алгоритмов обработки сигнала.

Комаров Глеб Владимирович – проведение экспериментальных исследований; подготовка статьи.

Мысленков Станислав Александрович – проведение экспериментальных исследований; обсуждение результатов; подготовка статьи.

Сильвестрова Ксения Петровна – подготовка и проведение дрейфтерных экспериментальных исследований.

Author's contribution

Igor G. Gorbunov, preparation of the paper text; carrying out measurements and calculations.

Vladimir I. Veremyev, management of the work; discussion of the results.

Vadim D. Shestak, software of signal processing.

Gleb V. Komarov, carrying out measurements; preparation of the paper text.

Stanislav A. Myslenkov, carrying out measurements; discussion of the results; preparation of the paper text.

Ksenia P. Silvestrova, preparing and carrying out drifter measurements.

Список литературы

1. Бархатов А. В., Веремьев В. И., Попов А. Г. Радиолокационный гидрографический мониторинг Невской губы // Материалы НПК "Проблемы прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий", СПб., 20 нояб. 2003. С. 30–32.

2. Сравнение характеристик течений, измеренных КВ и СВЧ радиолокаторами на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море, с данными ADCP и дрейфтеров / А. Г. Зацепин, В. В. Горбацкий, С. А. Мысленков, Н. Н. Шпилев, Д. И. Дудко, Д. В. Ивонин, К. П. Сильвестрова, В. И. Баранов, В. А. Телегин, С. Б. Куклев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космо-

са. 2017. Т. 14, № 7. С. 250–266. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-250-266

3. Определение скорости течения по измерениям навигационного радара с широкой диаграммой направленности антенны / Д. В. Ивонин, В. А. Телегин, А. И. Азаров, А. В. Ермошкин, В. В. Баханов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 219–227.

4. Булатов М. Г., Раев М. Д., Скворцов Е. И. Исследование динамики морских волн в прибрежной зоне по данным радиолокационных наблюдений высокого разрешения // Современные проблемы

дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 5, № 2. С. 76–81.

5. Предварительные результаты сравнения измерений вектора скорости течения навигационным радаром X-диапазона и донной станцией ADCP / Д. В. Ивонин, П. В. Чернышов, С. Б. Куклев, С. А. Мысленков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 2. С. 53–66. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-53-66

6. Wind Waves in the North Atlantic from Ship Navigational Radar: SeaVision Development and Its Validation with the Spotter Wave Buoy and WaveWatch III / N. Tilinina, D. Ivonin, A. Gavrikov, V. Sharmar, S. Gulev, A. Suslov, V. Fadeev, B. Trofimov, S. Bargman, L. Salavatova, V. Koshkina, P. Shishkova, E. Ezhova, M. Krinitsky, O. Razorenova, K. P. Koltermann, V. Tereschenkov, A. Sokov // Earth Syst. Sci. Data. 2022. Vol. 14. P. 3615–3633. doi: 10.5194/essd-14-3615-2022

7. Remote sensing in the Neva Bight / F. Ziemer, C. Brockmann, R. A. Vaughan, A. Barkatov // EARSel eProceedings. 2004. Vol. 3, № 2. P. 276–281.

8. Hwang P. A., Sletten M. A., Toporkov J. V. A note on Doppler processing of coherent radar backscatter from the water surface: With application to ocean surface wave measurements // J. of Geophysical Research: Oceans. 2010. Vol. 115, № C03026. P. 1–8. doi: 10.1029/2009JC005870

9. On the Interpretation of Coherent Marine Radar Backscatter From Surf Zone Waves / M. Streßer, J. Seemann, R. Carrasco, M. Cysewski, J. Horstmann, B. Baschek, G. Deane // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2022. Vol. 60. Art № 5105514. P. 1–14. doi: 10.1109/TGRS.2021.3103417

10. Determination of the Sea Surface Current Field from the Doppler Shift of the Coherent Radar Backscatter with Grazing Incidence / H. Hatten, J. Seemann, Ch. M. Senet, A. Bezuglov, V. Veremjev, F. Ziemer // OCEANS 2000 MTS/IEEE Conf. & Exhibition Providence. Conf. Proc. Providence, USA, 11–14 Sept. 2000. IEEE, 2002. P. 549–554. doi: 10.1109/OCEANS.2000.881312

11. Ziemer F., Braun N., Bezuglov A. Sea-Surface Current Features Observed by Doppler Radar // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2008. Vol. 46, № 4. P. 1125–1133. doi: 10.1109/TGRS.2007.910221

12. О проведении измерений характеристик морской поверхности с использованием когерентного радара СВЧ-диапазона / В. И. Веремьев, И. Г. Горбунов, А. Г. Зацепин, С. Б. Куклев, Д. Ю. Куликова, В. А. Телегин // Сб. ст. IV Междунар. науч.-практ. конф. "Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных

систем" "Радиоинфоком-2019". М.: МИРЭА, 2019. С. 8–12.

13. Kulikova D. Yu., Gorbunov I. G. Analysis of the Sea Surface Parameters by Doppler X-Band Radar in the Coastal Zone of the Black Sea // Proc. of the IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). Saint Petersburg and Moscow, Russia, 28–31 Jan. 2019. IEEE, 2019. P. 1185–1188. doi: 10.1109/ElConRus.2019.8657257

14. Определение скорости течения на морской поверхности доплеровским радиолокатором X-диапазона / А. В. Ермошкин, И. А. Капустин, А. А. Мольков, Н. А. Богатов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 3. С. 93–103. doi: 10.7868/S2073667320030089

15. Изучение гидрофизических процессов на шельфе и верхней части континентального склона Черного моря с использованием традиционных и новых методов измерений / А. Г. Зацепин, А. О. Корж, В. В. Кременецкий, А. Г. Островский, С. Г. Поярков, Д. М. Соловьев // Океанология. 2008. Т. 48, № 4. С. 510–519.

16. Использование дрейфующих буев и буксируемого профилографа для исследования течений на шельфе Черного моря / С. А. Мысленков, А. Г. Зацепин, К. П. Сильвестрова, В. И. Баранов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География. 2014. № 6. С. 73–80.

17. Возможности использования GPS-дрифтеров для исследования течений на шельфе Черного моря / К. П. Сильвестрова, С. А. Мысленков, А. Г. Зацепин, Е. В. Краюшкин, В. И. Баранов, Т. Е. Самсонов, С. Б. Куклев // Океанология. 2016. Т. 56, № 1. С. 159–166. doi: 10.7868/S0030157416010111

18. X-Band Microwave Backscattering from Ocean Waves / P. Y. Lee, J. D. Barter, K. L. Beach, C. L. Hindman, B. M. Lade, H. Rungaldier, J. C. Shelton, A. B. Williams, R. Yee, H. C. Yuen // J. of Geophysical Research. 1995. Vol. 100, № 2. P. 2591–2611. doi: 10.1029/94JC02741

19. Ziemer F., Cysewski M., Seemann J. Sea Surface Current Mapping by Radar Doppler Current Profiler // Oceans'10 IEEE Sydney. 2010. P. 1–7. doi: 10.1109/OCEANSSYD.2010.5603894

20. Бородин М. А., Михайлов В. Н., Филиппова П. А. Математическая модель доплеровского спектра сигнала, рассеянного морской поверхностью, при скользких углах облучения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 3. С. 63–73. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-63-73

21. Давидан И. Н., Лопатухин Л. И., Рожков В. А. Ветровое волнение в мировом океане / под ред. И. Н. Давидана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 256 с.

22. Морская радиолокация / под ред. В. И. Винокурова. Л.: Судостроение, 1986. 256 с.

Информация об авторах

Горбунов Игорь Геннадьевич – научный сотрудник НИИ "Прогноз" Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 30 научных работ, в том числе по теме статьи. Автор более 30 научных работ, в том числе по теме статьи.

О верификации измерений скорости поверхностных течений когерентным радаром

СВЧ-диапазона с помощью дрейфтеров

Verifying Measurements of Surface Current Velocities by X-Band Coherent Radar Using Drifter Data

работ. Сфера научных интересов – комплексные вопросы построения радиолокационных систем; радиолокационные методы исследования морской поверхности; комплексный экологический мониторинг.

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

E-mail: gor-ig@mail.ru

Веремьев Владимир Иванович – кандидат технических наук (2000), профессор кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), директор НИИ "Прогноз". Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – комплексный экологический мониторинг; комплексные вопросы построения радиолокационных систем; многодиапазонные многопозиционные радиолокационные комплексы для мониторинга воздушного пространства и морской поверхности.

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

E-mail: vervladiv@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8167-6616>

Шестак Вадим Дмитриевич – студент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности "Радиоэлектронные системы и комплексы" (год окончания 2023). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – информационно-измерительные системы.

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

E-mail: shestak.01@inbox.ru

Комаров Глеб Владимирович – инженер по специальности "Радиоэлектронные системы и комплексы" (2020), аспирант кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – антенные системы; электродинамическое моделирование; распространение радиоволн.

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

E-mail: komarov_gleb@list.ru

Мысленков Станислав Александрович – кандидат физико-математических наук (2017), старший научный сотрудник кафедры океанологии Московского государственного университета им. М. И. Ломоносова. Старший научный сотрудник Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Автор более 160 научных работ. Сфера научных интересов – ветровое волнение; структура вод, циркуляция вод.

Адрес: Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, Ленинские горы, Москва, 119991, Россия

E-mail: stasoccean@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7700-4398>

Сильвестрова Ксения Петровна – кандидат географических наук (2019), старший научный сотрудник лаборатории экспериментальной физики океана Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – исследования динамики вод; гидрофизические процессы.

Адрес: Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Нахимовский пр., д. 36, Москва, 117997, Россия

E-mail: office@ocean.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7515-6398>

References

1. Barkhatov A. V., Veremjev V. I., Popov A. G. *Radiolokatsionny gidrograficheskii monitoring Nevskoi guby* [Radar Hydrographic Monitoring of the Neva Bay]. Proc. of Conf. "Problems of Forecasting and Prevention of Emergencies and Their Consequences", 20 Nov. 2003, SPb, pp. 30–32. (In Russ.)

2. Zatsepin A. G., Gorbatskiy V. V., Myslenkov S. A., Shpilev N. N., Dudko D. I., Ivonin D. V., Silvestrova K. P., Baranov V. I., Telegin V. A., Kuklev S. B. Comparison of Coastal Currents Measured by HF and X-Band Radars with ADCP and Drifter Data at the IO RAS Hydrophysical Test Site in the Black Sea. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of

the Earth From Space]. 2017, vol. 14, no. 7, pp. 250–266. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-250-266 (In Russ.)

3. Ivonin D. V., Telegin V. A., Azarov A. I., Ermoshkin A. V., Bakhanov V. V. Possibility to Measure Velocity Vector of Surface Current by Means of Nautical Radar with Wide Beamwidth. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]. 2011, vol. 8, no. 4, pp. 219–227. (In Russ.)

4. Bulatov M. G., Raev M. D., Skvortsov E. I. Investigation of the Dynamics of Sea Waves in the Coastal Zone Based on High-Resolution Radar Observations. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Re-

remote Sensing of the Earth from Space]. 2005, vol. 2, no. 5, pp. 76–81. (In Russ.)

5. Ivonin D. V., Chernyshov P. V., Kuklev S. B., Myslenkov S. A. Preliminary Comparisons of Sea Current Velocity Vector Measurements by a Nautical X-Band Radar and Moored ADCP. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth From Space]. 2016, vol. 13, no. 2, pp. 53–66. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-53-66 (In Russ.)

6. Tilinina N., Ivonin D., Gavrikov A., Sharmar V., Gulev S., Suslov A., Fadeev V., Trofimov B., Bargman S., Salavatova L., Koshkina V., Shishkova P., Ezhova E., Krinitsky M., Razorenova O., Koltermann K. P., Tereschenkov V., Sokov A. Wind Waves in the North Atlantic from Ship Navigational Radar: SeaVision Development and its Validation with the Spotter Wave Buoy and WaveWatch III. *Earth Syst. Sci. Data*. 2022, vol. 14, pp. 3615–3633. doi: 10.5194/essd-14-3615-2022

7. Ziemer F., Brockmann C., Vaughan R. A., Barakatov A. Remote Sensing in the Neva Bight EARSel eProceedings. 2004, vol. 3, no. 2, pp. 276–281.

8. Hwang P. A., Sletten M. A., Toporkov J. V. A Note on Doppler Processing of Coherent Radar Backscatter from the Water Surface: with Application to Ocean Surface Wave Measurements. *J. of Geophysical Research: Oceans*. 2010, vol. 115, no. C03026, pp. 1–8. doi: 10.1029/2009JC005870

9. Streßer M., Seemann J., Carrasco R., Cysewski M., Horstmann J., Baschek B., Deane G. On the Interpretation of Coherent Marine Radar Backscatter From Surf Zone Waves. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2022, vol. 60, art no. 5105514, pp. 1–14. doi: 10.1109/TGRS.2021.3103417

10. Hatten H., Seemann J., Senet Ch. M., Bezuglov A., Veremjev V., Ziemer F. Determination of the Sea Surface Current Field from the Doppler Shift of the Coherent Radar Backscatter with Grazing Incidence. *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conf. & Exhibition Providence*. Conf. Proc. Providence, USA, 11–14 Sept. 2000. IEEE, 2002. P. 549–554. doi: 10.1109/OCEANS.2000.881312

11. Ziemer F., Braun N., Bezuglov A. Sea-Surface Current Features Observed by Doppler Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2008, vol. 46, no. 4, pp. 1125–1133. doi: 10.1109/TGRS.2007.910221

12. Veremjev V. I., Gorbunov I. G., Zatsepin A. G., Kuklev S. B., Kulikova D. Y., Telegin V. A. *O provedenii izmerenii kharakteristik morskoi poverkhnosti s ispol'zovaniem kogerentnogo radara SVCh-diapazona* [On Measuring the Characteristics of the

Sea Surface Using a Coherent Microwave Radar]. *Proc. of the Conf. "Radioinfocom 2019"*, Moscow, MIREA, 2019, pp. 8–12. (In Russ.)

13. Kulikova D. Yu., Gorbunov I. G. Analysis of the Sea Surface Parameters by Doppler X-Band Radar in the Coastal Zone of the Black Sea. *Proc. of the IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. Saint Petersburg and Moscow, Russia, 28–31 Jan. 2019. IEEE, 2019, pp. 1185–1188. doi: 10.1109/ElConRus.2019.8657257

14. Ermoshkin A. V., Kapustin I. A., Molkov A. A., Bogatov N. A. Determination of the Sea Surface Current by a Doppler X-Band Radar. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2020, vol. 13, no 3, pp. 93–103. doi: 10.7868/S2073667320030089 (In Russ.)

15. Zatsepin A. G., Korzh A. O., Kremenetskii V. V., Ostrovskii A. G., Poyarkov S. G., Solov'ev D. M. Studies of the Hydrophysical Processes Over the Shelf and Upper Part of the Continental Slope of the Black Sea with the Use of Traditional and New Observation Techniques. *Oceanology*. 2008, vol. 48, no. 4, pp. 510–519. (In Russ.)

16. Myslenkov S. A., Zatsepin A. G., Silverstova K. P., Baranov V. I. Application of Drift Buoys and Towed Profiler for Investigation of Currents within the Black Sea Continental Shelf. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 5, Geografiya*. 2014, no. 6, pp. 73–80. (In Russ.)

17. Silverstova K. P., Myslenkov S. A., Zatsepin A. G., Krayushkin E. V., Baranov V. I., Samsonov T. E., Kuklev S. B.. GPS-Drifters for the Study of Water Dynamics in the Black Sea Shelf Zone. *Okeanologiya*. 2016, vol. 41, no. 5, pp. 159–166. doi: 10.7868/S0030157416010111 (In Russ.)

18. Lee P. Y., Barter J. D., Beach K. L., Hindman C. L., Lade B. M., Rungaldier H., Shelton J. C., Williams A. B., Yee R., Yuen H. C. X-Band Microwave Backscattering from Ocean Waves. *J. of Geophysical Research*. 1995, vol. 100, no. 2, pp. 2591–2611. doi: 10.1029/94JC02741

19. Ziemer F., Cysewski M., Seemann J. Sea Surface Current Mapping by Radar Doppler Current Profiler. *Oceans'10 IEEE Sydney*. 2010, pp. 1–7. doi: 10.1109/OCEANSSYD.2010.5603894

20. Borodin M. A., Mikhaylov V. N., Filippova P. A. Doppler Spectrum Mathematical Model of Signal Scattering from Sea Surface. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2019, vol. 22, no. 3, pp. 63–73. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-63-73

21. *Vetrovoe volnenie v mirovom okeane* [Wind Waves in the World Ocean]. Ed. by I. N. Davidan. Leningrad, *Gidrometeoizdat*, 1985, 256 p. (In Russ.)

22. *Morskaya radiolokatsiya* [Marine Radiolocation]. Ed. by V. I. Vinokurov. Leningrad, *Sudostroenie*, 1986, 256 p. (In Russ.)

Information about the authors

Igor G. Gorbunov, Scientist of the Research Institute "Prognoz" in Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: complex issues of building radar systems; radar systems for sea surface research; integrated environmental monitoring.

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

E-mail: gorb-ig@mail.ru

Vladimir I. Veremyev, Cand. Sci. (2000), Professor of the Department of Radio Engineering Systems in Saint Petersburg Electrotechnical University, director of the Research Institute "Prognoz". The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: integrated environmental monitoring; complex issues of building radar systems; multi-band multi-position radar systems for airspace and sea surface monitoring.

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

E-mail: vervladiv@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8167-6616>

Vadim D. Shestak, A student of Saint Petersburg Electrotechnical University in "Radioelectronic systems and complexes". The author of 1 scientific publication. Area of expertise: information and measurement systems.

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

E-mail: shestak.01@inbox.ru

Gleb V. Komarov, Engineer in "Radioelectronic systems and complexes" (2020), Postgraduate Student of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. Author of 5 scientific publications. Area of expertise: antenna systems; electrodynamic simulation and radio wave propagation.

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

E-mail: komarov_gleb@list.ru

Stanislav A. Myslenkov, Cand. Sci. (2017), Senior Researcher of the Department of Oceanology in Lomonosov Moscow State University. Senior Researcher of the Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences. The author of more than 160 scientific publications. Area of expertise: oceanography; wind waves; water structures; water circulation.

Address: Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, GSP-1, Leninskie gory, Moscow 119991, Russia

E-mail: stasocan@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7700-4398>

Ksenia P. Silvestrova, Cand. Sci. (2019), Senior Researcher of the Department of Physics Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: hydrophysics; ocean currents and circulation.

Address: Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovskiy pr., Moscow 117997, Russia

E-mail: office@ocean.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7515-6398>

Электрокалорический эффект в многослойных сегнетоэлектрических структурах

А. С. Старков¹, А. С. Анохин^{1,2✉}, А. В. Еськов^{1,2}, А. А. Семенов², А. Л. Холкин³

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

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

³ Уральский федеральный университет им. первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

✉ asanokhin@itmo.com

Аннотация

Введение. Сегнетоэлектрические пленки находят широкое применение в микроэлектронике, технике СВЧ, сенсорике и в устройствах преобразования энергии на основе электрокалорического и пьезоэлектрического эффектов. В зависимости от области применения к сегнетоэлектрическим структурам могут предъявляться различные требования, такие, как высокие значения диэлектрической проницаемости и добротности, температурная стабильность, или же, наоборот, используется температурная нестабильность пьезоэлектрического коэффициента для построения высокочувствительных элементов микросенсорики. Одним из способов получения сегнетоэлектрических сред, обладающих требуемыми свойствами в заданном температурном диапазоне, является создание слоистых пленочных структур, состоящих из нескольких различных сегнетоэлектрических материалов.

Цель работы. Разработка математической модели, позволяющей рассчитывать такие электрофизические свойства многослойных пленочных сегнетоэлектрических структур, как низкочастотная диэлектрическая проницаемость, электрическая поляризация и электрокалорический эффект, при учете соотношения толщин и порядка чередования слоев, а также механических напряжений, возникающих на границах между элементами многослойной структуры.

Материалы и методы. На основе феноменологической теории сегнетоэлектричества Ландау–Гинзбурга–Девоншира разработана математическая модель, позволяющая усреднять электро- и теплофизические свойства слоев с учетом механических напряжений на границах слоев, что обеспечивает реалистичное количественное описание многослойных пленочных сегнетоэлектрических структур.

Результаты. Представлено описание температурного и полевого поведения низкочастотной диэлектрической проницаемости, поляризации и электрокалорического эффекта для структуры, состоящей из чередующихся поликристаллических слоев двух сегнетоэлектрических материалов, при толщинах отдельных слоев более 100 нм с учетом нормального распределения размеров зерен в отдельных слоях.

Заключение. Показано влияние соотношения толщин слоев, среднего размера зерна и порядка чередования слоев на электрофизические и теплофизические свойства многослойных сегнетоэлектрических структур. Разработанная модель может быть использована для подбора оптимальных параметров многослойных структур в соответствии с их назначением.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики, титанат бария, многослойные пленочные структуры, электрокалорический эффект

Для цитирования: Электрокалорический эффект в многослойных сегнетоэлектрических структурах / А. С. Старков, А. С. Анохин, А. В. Еськов, А. А. Семенов, А. Л. Холкин // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 3. С. 111–121. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-111-121

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 20-58-26015).

Статья поступила в редакцию 12.12.2022; принята к публикации после рецензирования 20.02.2023; опубликована онлайн 29.06.2023



Electrocaloric Effect in Multilayer Ferroelectric Structures

Alexander S. Starkov¹, Alexander S. Anokhin^{1,2✉}, Andrey V. Es'kov^{1,2},
Alexander A. Semenov², Andrey L. Kholkin³

¹ ITMO University, St Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

³ Ural Federal University, St Petersburg, Russia

✉ asanokhin@itmo.com

Abstract

Introduction. Ferroelectric films are widely used for radiotechnical, microwave microelectronic, sensoric, and energy conversion purposes. Such a diverse application range demands film materials with specific electrophysical properties. For instance, while energy storage applications require materials with a high dielectric constant, energy conversion devices largely use those with a low dielectric constant. The necessary physical properties can be achieved using multicomponent ferroelectric structures, such as solid solutions, composites, and multilayer film structures. Mechanical stresses between the substrate and ferroelectric layers play an extremely important role in dielectric properties of multilayer structures.

Aim. Development of a mathematical model quantifying the ferroelectric polarization, static dielectric constant, as well as pyroelectric and electrocaloric properties of multilayered ferroelectric film structures.

Materials and methods. The presented model is based on the Landau–Ginzburg–Devonshire model (LGD) considering elasticity equations and using electric induction as the order parameter.

Results. The developed mathematical model based on LGD provides for a quantifiable description of dielectric, pyroelectric, and electrocaloric properties of layered ferroelectric structures. This model displays the effect of the thickness ratio of polycrystalline layers and grain size distribution on the dielectric properties of films.

Conclusion. The developed quantitative model demonstrates the dependence of the thickness, grain size, and stacking order of ferroelectric layers on the dielectric constant and pyroelectric coefficient of multilayered polycrystalline film structures. The presented model can be applied when optimizing the parameters of multilayer structures with respect to their application area.

Keywords: ferroelectric films, barium titanate, multilayered structures, electrocaloric effect

For citation: Starkov A. S., Anokhin A. S., Es'kov A. V., Semenov A. A., Kholkin A. L. Electrocaloric Effect in Multilayer Ferroelectric Structures. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 3, pp. 111–121. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-111-121

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

Acknowledgements. This work is supported by RFBR (project № 20-58-26015).

Submitted 12.12.2022; accepted 20.02.2023; published online 29.06.2023

Введение. Сегнетоэлектрические тонкие пленки находят широкое применение в различных областях техники, микро- и нанoeлектроники, в конденсаторах, различных электронных компонентах, интегральных запоминающих устройствах [1]. Относительно новым перспективным направлением использования многослойных сегнетоэлектрических пленок является твердотельное охлаждение, основанное на электрокалорическом эффекте (ЭКЭ) [2]. ЭКЭ заключается в изменении тепловых свойств

(температуры и энтропии) образца при приложении или снятии электрического поля. К сожалению, при комнатных температурах заметный ЭКЭ обнаружен в тех сегнетоэлектриках, которые не удовлетворяют требованиям экологической безопасности (свинцовосодержащие материалы [3]), обладают низкой теплопроводностью [4] либо теряют свои свойства после непродолжительного промежутка работы [5] (органические сегнетоэлектрики на основе поливинилиденфторида). Ввиду этого в послед-

ние годы возобновился интерес к одному из старейших сегнетоэлектриков – титанату бария BaTiO_3 . Вблизи фазового перехода в сегнетоэлектрическую фазу кристаллический BaTiO_3 обладает значительным ЭКЭ, достигающим 1.6 К при напряжениях в 1 МВ/м [6]. Задача создания рабочего тела для твердотельного охлаждающего устройства была бы во многом решена, если бы удалось понизить температуру фазового перехода титаната бария до комнатной при незначительном снижении ЭКЭ. Добиться этого можно различными способами. Одним из них является легирование BaTiO_3 . В данной статье рассматривается возможность снижения температуры фазового перехода в пленках титаната бария за счет создания многослойной структуры, содержащей слои титаната бария и титаната стронция.

При описании свойств сегнетоэлектрических пленок возникает немало сложностей. Наличие электрического поля вследствие электрострикционного или пьезоэлектрического эффекта приводит к возникновению упругих напряжений. Кроме того, большие механические напряжения (misfit strain) также возникают на границах между слоями и на границе *пленка-подложка* вследствие несоответствия параметров решеток слоев пленки и подложки, различия их коэффициентов теплового расширения. В результате сегнетоэлектрические свойства пленок могут существенно отличаться от свойств объемных образцов, значительно изменяются температура сегнетоэлектрического фазового перехода, диэлектрическая проницаемость и пьезоэлектрический коэффициент слоев. Следовательно, для достаточно точного описания сегнетоэлектрических многослойных пленочных структур необходимо учитывать как электрическое, так и упругое поле. Уравнения, описывающие указанные поля, являются нелинейными [7]. В силу этого теория тепловых явлений в слоистых сегнетоэлектрических пленках содержит множество пробелов. В данной статье рассматривается задача об определении электрического поля в многослойной сегнетоэлектрической структуре, содержащей произвольное число слоев, решение которой позволяет определить изменение температуры структуры при изменении электрического поля

вследствие ЭКЭ. При изучении ЭКЭ в системе делается несколько допущений. Предполагается, что электрическое поле (напряженность электрического поля E и электрическая индукция D) имеет только одну компоненту, перпендикулярную поверхности пленки [8]. Для описания температурного диапазона вблизи температуры фазового перехода к сегнетофазе, где наиболее силен ЭКЭ, этого предположения достаточно. Межпленочные границы считаются идеальными, т. е. проскальзывание на них отсутствует.

Уравнение электроупругости в пленке и граничные условия. Пусть имеется n слоев сегнетоэлектрических материалов. Границы слоев в декартовой системе координат (x_1, x_2, x_3) , $(x_3 \equiv z)$ задаются уравнениями $z = z_0 = 0, z_1, \dots, z_n$. Толщину j -го слоя обозначим через $h_j = z_j - z_{j-1}$ ($j = 1, 2, \dots, n$), а толщину всей пленки через $H = z_n$. Границы слоя поддерживаются при разности потенциалов V . Предполагается, что электрическое поле (напряженность, электрическое смещение и поляризация) вследствие малой толщины системы имеет только одну компоненту, перпендикулярную поверхности пленки. Распределение полей в пленке описывается при помощи напряженности электрического поля E , компонент векторов электрической индукции D и упругих смещений u_i , тензоров деформаций $u_{ik} = (u_{i,k} + u_{k,i})/2$ и упругих напряжений σ_{ik} .

Здесь и далее индекс после запятой означает дифференцирование по соответствующей переменной $X_{...,i} = \partial X / \partial x_i$. Индекс i принимает значения 1, 2, 3. Верхний индекс в величинах, указывающий на номер слоя, будет указываться только тогда, когда это важно. Слой характеризуется упругими постоянными c_{iklm} , электрострикционными коэффициентами q_{ikl} и коэффициентами Гинзбурга–Ландау a, b, c , причем от температуры T зависит только коэффициент $a = a_0(T - T_0)$, где $a_0 = 1/(\epsilon_0 C)$; T_0 – температура Кюри–Вейсса; ϵ_0 – электрическая постоянная; C – постоянная Кюри.

В общем случае число материальных постоянных, характеризующих среду, составляет

несколько десятков. Чтобы упростить последующие формулы, дальнейшие вычисления проведем для случая трансверсально-изотропной среды, когда ось симметрии совпадает с осью $z = x_3$. В этом случае имеется 2 электрострикционных коэффициента $\{q_{13}, q_{33}\}$, а также 5 упругих постоянных $\{c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{33}, c_{44}\}$. Здесь при записи индексов осуществлен переход к матричным обозначениям Фойгта.

Уравнения электростатики при сделанных предположениях сводятся к условию постоянства электрической индукции $D = \text{const}$. Связь напряжения и индукции запишем в виде [9]

$$E = aD + bD^3 + cD^5 - 2D[q_{13}(u_{11} + u_{22}) + q_{33}u_{33}]. \quad (1)$$

Отметим, что в качестве параметра порядка в уравнении состояния (1) взята электрическая индукция D , а не поляризация P . Достоинства и недостатки этого выбора детально рассмотрены в [10]. Решающим преимуществом выбора D в качестве параметра порядка в данном случае является то, что величина D для многослойной задачи непрерывна и не меняется на границе различных слоев. Вследствие уравнений электростатики D есть постоянная величина, не меняющаяся от слоя к слою, что существенно упрощает последующие вычисления. При малых электрических полях для сегнетоэлектриков с большим значением диэлектрической проницаемости поляризация P и электрическая индукция D практически совпадают. Это означает, что значения поляризации, рассчитанные по формуле (1), мало отличаются от значений, вычисленных по аналогичной формуле, в которой электрическая индукция заменена на поляризацию.

Компоненты тензора напряжений σ_{ik} связаны с компонентами вектора смещений и электрическим полем соотношениями:

$$\sigma_{11} = c_{11}u_{11} + c_{12}u_{22} + c_{13}u_{33} - q_{13}D^2; \quad (2)$$

$$\sigma_{22} = c_{12}u_{11} + c_{11}u_{22} + c_{13}u_{33} - q_{13}D^2; \quad (3)$$

$$\sigma_{33} = c_{13}u_{11} + c_{13}u_{22} + c_{33}u_{33} - q_{33}D^2; \quad (4)$$

$$\sigma_{23} = 2c_{44}u_{23}; \quad \sigma_{13} = 2c_{44}u_{13}; \quad \sigma_{12} = 2c_{66}u_{12}, \quad (5)$$

где $c_{66} = (c_{11} - c_{12})/2$. Из (2)–(5) следует, что ввиду постоянства D тензор деформации также будет постоянным. Его значения будут определяться граничными условиями.

На границах пленки используются стандартные граничные условия [7], [11], [12]. Верхняя граница пленки считается граничащей с воздухом и свободной от напряжений, никакие внешние силы на нее не действуют. Следовательно, на ней выполняются равенства $\sigma_{13} = \sigma_{23} = \sigma_{33} = 0$. На границе с подложкой отсутствует нормальная составляющая силы $\sigma_{33} = 0$. Также тангенциальная часть тензора деформаций задана как $u_{11} = u_{22} = u_m^0$, где u_m^0 – напряжение рассогласования между пленкой и подложкой (misfit strain). Напряжение рассогласования состоит из двух частей $u_{m1}^0 + u_{m2}^0$, где [7], [12]

$$u_{m1}^0 = \frac{a_s - a_f}{a_s}; \quad u_{m2}^0 = (T - T_g)(\alpha_s - \alpha_f). \quad (6)$$

Здесь a_s и a_f – постоянные решетки материала подложки и пленки; T_g – температура, при которой происходит рост пленки; α_s и α_f – коэффициенты теплового расширения подложки и пленки. На внутренних границах между слоями пленки должны быть непрерывны нормальная компонента вектора смещений, нормальные компоненты тензора напряжений, а компоненты тензора деформации имеют скачок, определяемый напряжением рассогласования между слоями u_s^j :

$$[u_3] = 0; \quad [\sigma_{i3}] = 0; \quad i = 1, 2, 3;$$

$$[u_{11}] = [u_{22}] = u_m^j.$$

Величина u_s^j также предполагается состоящей из двух частей вида (6). В силу равенства нулю σ_{33} на границах значение u_s^j тождественно равно нулю. Из уравнений упругости вытекает также постоянство u_{11} , u_{22} . Для этих величин из граничных условий вытекает равенство

$$u_{33}^j = u_{22}^j = \sum_{i < j} u_m^j. \quad (7)$$

Компонента u_{33} находится из уравнений (2)–(5) и имеет вид

$$u_{33} = \frac{q_{33}}{c_{33}} D^2 - \frac{c_{13}}{c_{33}} (u_{11} + u_{22}). \quad (8)$$

После определения компонент тензора деформации через электрическое смещение необходимо определить индукцию D . Для этого следует умножить обе части соотношения (1) на толщину слоя и просуммировать по слоям. В левой части возникнет разность потенциалов V . В результате получим уравнение для постоянной D

$$V/H = \hat{a}D + \hat{b}D^3 + \hat{c}D^5, \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} \hat{a} &= \frac{1}{H} \sum_{j=1}^n \left[a^j - 2 \left(q_{13}^j - q_{33}^j \frac{c_{13}}{c_{33}} \right) (u_{11}^j + u_{22}^j) \right] h_j; \\ \hat{b} &= \frac{1}{H} \sum_{j=1}^n \left(b^j - \frac{2q_{33}^j}{c_{33}^j} \right) h_j; \\ \hat{c} &= \frac{1}{H} \sum_{j=1}^n c^j h_j. \end{aligned} \quad (10)$$

Уравнения (7)–(10) полностью описывают распределения полей в кристаллических пленках.

Для поликристаллической сегнетоэлектрической керамики следует учитывать распределение зерен по размерам. Например, зависимость температуры Кюри–Вейсса от размера зерен d (в микрометрах) для титаната бария имеет вид [13]

$$T_0(d) = T_0(0) + \frac{3.2}{d},$$

где $T_0(0)$ – температура Кюри–Вейсса при бесконечно малом размере зерна. Точный закон распределения зерен по размерам неизвестен, но естественно предположить, что это либо нормальное распределение

$$w_n(d, L, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{(d-L)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (11)$$

либо логнормальное [14]

$$w_{ln}(d, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}d\sigma} \exp \left[-\frac{(\ln d - \mu)^2}{2\sigma^2} \right],$$

где L – среднее значение размера зерна; σ – среднеквадратичное отклонение; μ – медиана

распределения. Для любого закона зависимость средней по образцу поляризации $\bar{P}$ задается интегралом

$$\bar{P} = \int w(d)P(d)dd,$$

где $w(d)$ – любое распределение; $P(d)$ – поляризация, отвечающая размеру зерна d .

Среднее по керамике значение ЭКЭ $\Delta\bar{T}$ рассчитывается по формуле

$$\Delta\bar{T} = \int w(d)\Delta T(d)dd,$$

где $\Delta T(d)$ – изменение температуры при ЭКЭ в зерне размером d . Для расчета $\Delta T(d)$ в отдельно взятом зерне будем использовать классическую формулу [9]

$$dT = -\frac{T}{C_E} \frac{\partial D}{\partial T} dE,$$

где C_E – теплоемкость при постоянном электрическом поле.

Результаты. В качестве иллюстрации предлагаемой методики расчетов была рассмотрена структура из слоев титанатов бария BaTiO_3 (BTO) и стронция SrTiO_3 (STO) на подложке из MgO . Материальные параметры брались из [15, 16]. Для титаната бария:

$$\begin{aligned} a &= 3.34 \cdot 10^5 (T - 381) \text{ [(Дж·м)/Кл}^2\text{]}; \\ b &= 4.69 \cdot 10^6 (T - 393) - 2.02 \cdot 10^8 \text{ [(Дж·м}^5\text{)/Кл}^4\text{]}; \\ c &= -5.52 \cdot 10^7 (T - 393) + 2.76 \cdot 10^9 \text{ [(Дж·м}^9\text{)/Кл}^6\text{]}; \\ c_{11} &= c_{22} = c_{33} = 1.79 \cdot 10^{11} \text{ [Дж/м}^3\text{]}; \\ c_{12} &= c_{13} = 0.964 \cdot 10^{11} \text{ [Дж/м}^3\text{]}; \\ c_{44} &= 1.22 \cdot 10^{11} \text{ [Дж/м}^3\text{]}; \\ q_{11} &= 14.2 \cdot 10^9 \text{ [(Дж·м)/Кл}^2\text{]}; \\ q_{12} &= -0.74 \cdot 10^9 \text{ [(Дж·м)/Кл}^2\text{]}; \\ q_{14} &= 1.57 \cdot 10^9 \text{ [(Дж·м)/Кл}^2\text{]}. \end{aligned}$$

Для титаната стронция:

$$\begin{aligned} a &= 7.1 \cdot 10^5 (T - 35) \text{ [(Дж·м)/Кл}^2\text{]}; \\ b &= 1.7 \cdot 10^9 (T - 393) - 2.02 \cdot 10^8 \text{ [(Дж·м}^5\text{)/Кл}^4\text{]}; \\ c &= 0; c_{11} = c_{22} = c_{33} = 3.156 \cdot 10^{11} \text{ [Дж/м}^3\text{]}; \\ c_{12} &= c_{13} = 1.01 \cdot 10^{11} \text{ [Дж/м}^3\text{]}; \\ c_{44} &= 1.19 \cdot 10^{11} \text{ [Дж/м}^3\text{]}; \\ q_{11} &= 2.2 \cdot 10^{10} \text{ [(Дж·м)/Кл}^2\text{]}; \\ q_{12} &= 0.2 \cdot 10^{10} \text{ [(Дж·м)/Кл}^2\text{]}. \end{aligned}$$

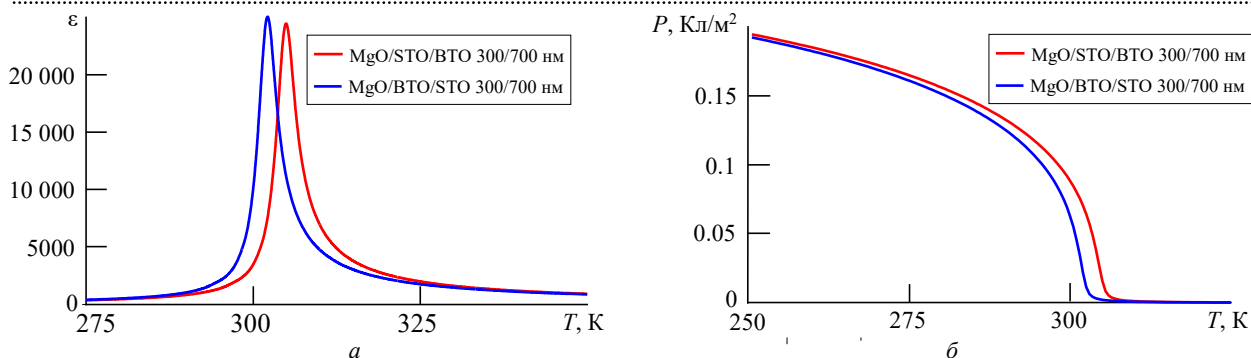


Рис. 1. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости (а) и спонтанной поляризации (б) для структур MgO/STO/BTO и MgO/BTO/STO

Fig. 1. Temperature dependence of dielectric constant (a) and spontaneous polarization (b) for MgO/STO/BTO and MgO/BTO/STO structures

$$q_{14} = 1.1 \cdot 10^{10} \text{ [(Дж·м)/Кл}^2\text{]}.$$

Были рассчитаны температурные зависимости поляризации, пьезоэлектрического коэффициента, диэлектрической проницаемости и ЭКЭ. На рис. 1, а, б представлена температурная зависимость диэлектрической проницаемости и спонтанной поляризации для двухслойной структуры BTO/STO. Расчеты показали, что свойства системы зависят от порядка чередования слоев. При одинаковом отношении толщин слоев (3:7) изменение порядка их чере-

дования приводит к сдвигу температуры максимума диэлектрической проницаемости на несколько градусов. При этом максимальное значение диэлектрической проницаемости также изменяется на несколько процентов.

Температурная зависимость спонтанной поляризации, пьезоэлектрического коэффициента, диэлектрической проницаемости и ЭКЭ при различных соотношениях толщин слоев представлена на рис. 2. Расчеты показали, что для каждой из вышеперечисленных величин

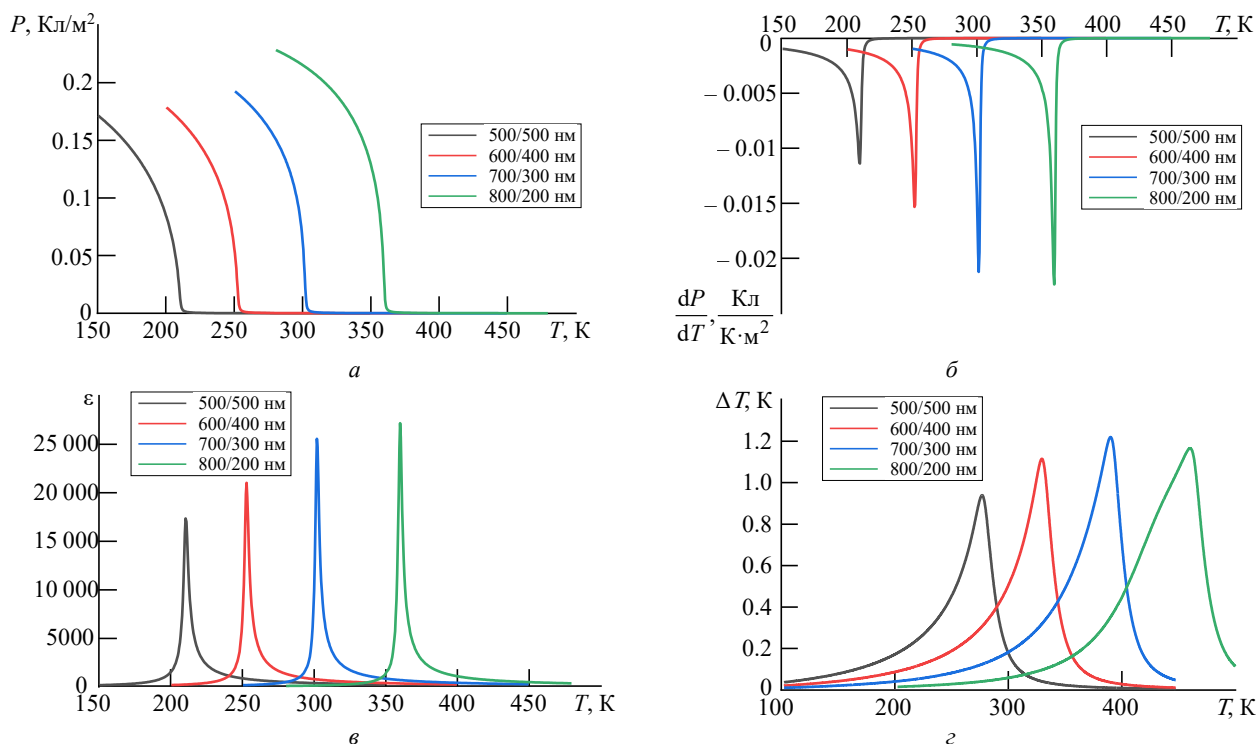


Рис. 2. Температурные зависимости спонтанной поляризации (а), пьезоэлектрического коэффициента (б), диэлектрической проницаемости (в) и ЭКЭ (г) в структуре MgO/BTO/STO при различном соотношении толщин слоев

Fig. 2. Temperature dependences of spontaneous polarization (a), pyroelectric coefficient (b), static dielectric constant (c) and electrocaloric effect (d) for MgO/BTO/STO structure with different layer thickness ratio

существует оптимальное соотношение слоев, при котором ее значение достигает абсолютного максимума. Эти оптимальные соотношения несколько различаются для различных величин. В частности, увеличение толщины слоя ВТО вплоть до соотношения толщин ВТО:СТО 8:2 приводит к повышению диэлектрической проницаемости и пьезоэлектрического коэффициента в слоистой структуре, однако максимум ЭКЭ наблюдается при соотношении толщин 7:3. Данное расхождение связано с тем, что ЭКЭ проявляется заметным образом в сильных электрических полях (рис. 2, ε соответствует напряженности 2 МВ/м), в то время как приведенные значения диэлектрической проницаемости и пьезоэлектрического коэффициента соответствуют слабым электрическим полям.

Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для различных значений среднего размера зерен в структуре ВТО/СТО с соотношением толщин 7:3 изображена на рис. 3. Ее наибольшее значение достигается

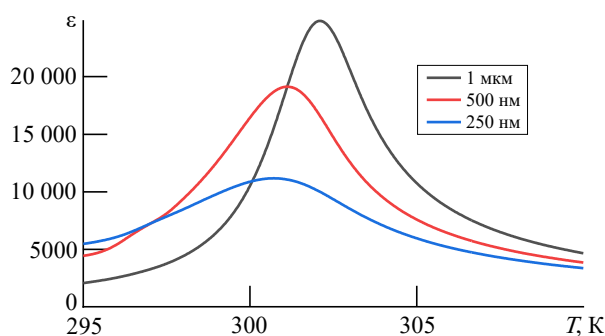


Рис. 3. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости двухслойной структуры с различными значениями среднего размера зерна в слоях

Fig. 3. Temperature dependence of dielectric constant in bilayered structure for different values of the average grain size in layers

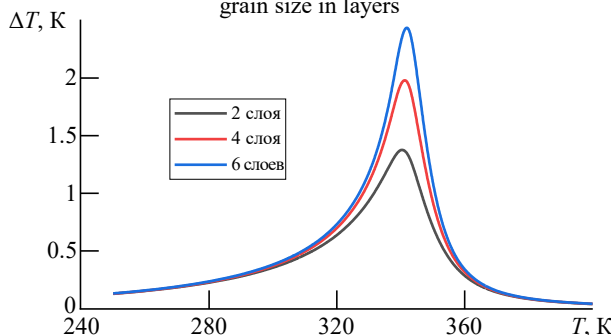


Рис. 4. Температурная зависимость ЭКЭ в многослойных структурах ВТО/СТО при различном количестве слоев

Fig. 4. Temperature dependence of the electrocaloric effect in ВТО/СТО multilayered structures under a different amount of layers

при d около 1 мкм. Приведенные результаты соответствуют нормальному распределению зерен по размерам (т. е. распределение зерен по размерам соответствует (11)).

При увеличении числа слоев ЭКЭ монотонно возрастает, но практически не изменяется температурный диапазон, в котором данный эффект заметно отличен от нуля (рис. 4).

Обсуждение. Выбор в качестве параметра порядка не поляризации, а электрического смещения позволил свести совокупность нелинейных уравнений сегнетоэлектричества к одному уравнению для всей системы сегнетоэлектрических пленок. В противном случае необходимо было бы решать нелинейные уравнения для каждого слоя по отдельности, что существенно увеличило бы время расчета. Так как сегнетоэлектрики обладают высокой диэлектрической проницаемостью, то замена P на D не приводит к заметному уменьшению точности в уравнении Гинзбурга–Ландау (10) и дает возможность при численных расчетах использовать одни и те же коэффициенты. Коэффициент $\hat{a}$ определяется упругими свойствами отдельных слоев и их коэффициентами теплового расширения. Отличие коэффициента $\hat{b}$ от своего среднего по слоям значения вызвано эффектом электрострикции. На коэффициенты при более высоких степенях упругие свойства не влияют. Коэффициент $\hat{c}$ есть взвешенное среднее аналогичных коэффициентов слоев.

Сравнение с экспериментальными данными [17, 18] показывает, что нормальное распределение зерен по размерам достаточно хорошо описывает температурную зависимость диэлектрической проницаемости в парафазе. При температурах, меньших температуры фазового перехода, точность использованного приближения заметно уменьшается. Увеличение погрешности, на взгляд авторов, связано не с изменением закона распределения, а с изменением зависимости коэффициентов $\hat{a}$ и $\hat{b}$ в (10) от размера зерен. Это изменение вызывается возникновением доменной структуры, которая влияет на упругие напряжения в зерне [19]. Проведенные вычисления показывают, что при расчете свойств керамики необходимо принимать во внимание не только случайное распределение температуры

Кюри–Вейсса, т. е. случайный характер коэффициента $\hat{a}$, но и зависимость коэффициента $\hat{b}$.

Выводы. Важность граничных условий при описании сегнетоэлектрических пленок хорошо известна. В данной статье рассмотрены условия, которые отвечают границе с подложкой и воздухом. Переход на другие виды граничных условий в рассматриваемом подходе никаких трудностей не вызывает. Так как в описываемых слоистых структурах толщина отдельных слоев была не менее 100 нм, значение напряжения рассогласования составляло 10 % от исходного в связи с релаксацией, связанной с образованием дефектов. В приведенной модели механические деформации и напряжения в пленке считались постоянными.

При рассмотрении более общего случая деформация рассогласования не является постоянной величиной и заметно релаксирует в приповерхностном слое. Уменьшение деформации вызвано влиянием градиентных слагаемых, в частности флексоэлектрическим эффектом. Для более точного описания физических процессов в сегнетоэлектрических пленочных структурах необходимо учитывать градиенты поляризации и деформации.

Разработанная теоретическая модель позволяет количественно описывать свойства сегнетоэлектрических многослойных структур и может быть использована для оптимизации ЭКЭ и создания высокоэффективного твердотельного охладителя.

Авторский вклад

Старков Александр Сергеевич – идея разработки математической модели; разработка аналитической модели.

Анохин Александр Сергеевич – разработка численной модели; подготовка материалов к публикации.

Еськов Андрей Владимирович – разработка численной модели; формирование структуры статьи.

Семенов Александр Анатольевич – анализ результатов расчетов; подготовка материалов к публикации.

Холкин Андрей Леонидович – анализ результатов расчетов.

Author's contribution

Alexander S. Starkov, idea of mathematic model; development of analytic model.

Alexander S. Anokhin, development of computational model; preparation of publication materials.

Andrey V. Es'kov, development of computational model; development of paper structure.

Alexander A. Semenov, analysis of computation results; preparation of publication materials.

Andrey L. Kholkin, analysis of computation results.

Список литературы

1. Сигов А. С., Мишина Е. Д., Мухортов В. М. Тонкие сегнетоэлектрические пленки: получение и перспективы интеграции // Физика твердого тела. 2010. Т. 52, № 4. С. 709–717.

2. New approaches to electrocaloric-based multilayer cooling / S. Karmanenko, A. Semenov, A. Dedyk, A. V. Es'kov // *Electrocaloric Materials*. Berlin: Heidelberg, Springer, 2014. P. 183–223. doi: 10.1007/978-3-642-40264-7_8

3. Valant M. Electrocaloric materials for future solid-state refrigeration technologies // *Progress in Materials Science*. 2012. Vol. 57, № 6. P. 980–1009. doi:10.1016/j.pmatsci.2012.02.001

4. Ferroelectric polymer nanocomposites with complementary nanostructured fillers for electrocaloric cooling with high power density and great efficiency / G. Zhang, B. Fan, P. Zhao, Zh. Hu, Y. Liu, F. Liu, Sh. Jiang, S. Zhang, H. Li, Q. Wang // *ACS Applied Energy Materials*. 2018. Vol. 1, № 3. P. 1344–1354. doi: 10.1021/acsaem.8b00052

5. High-entropy polymer produces a giant electrocaloric effect at low fields / X. Qian, D. Han, L. Zheng, J. Chen, M. Tyagi, Q. Li, F. Du, Sh. Zheng, X. Huang, Sh. Zhang et al. // *Nature*. 2021. Vol. 600, № 7890. P. 664–669. doi: 10.1038/s41586-021-04189-5

6. Entropy-change measurement of electrocaloric effect of BaTiO₃ single crystal / Y. Bai, K. Ding, G.-P. Zheng, S.-Q. Shi, L. Qiao // *Physica status solidi (a)*. 2012. Vol. 209, № 5. P. 941–944. doi: 10.1002/pssa.201127695

7. Pertsev N. A., Zembilgotov A. G., Tagantsev A. K. Effect of mechanical boundary conditions on phase diagrams of epitaxial ferroelectric thin films // *Physical Review Lett.* 1998. Vol. 80, № 9. P. 1988. doi: 10.1103/PhysRevLett.80.1988

8. Novak N., Pirc R., Kutnjak Z. Diffuse critical point in PLZT ceramics // *Europhysics Lett.* 2013. Vol. 102, № 1. P. 17003. doi: 10.1209/0295-5075/102/17003

9. Lines M. E., Glass A. M. Principles and applications of ferroelectrics and related materials.

Oxford: Oxford university press, 2001. 736 p. doi: 10.1093/acprof:oso/9780198507789.001.0001

10. Tagantsev A. K. Landau expansion for ferroelectrics: Which variable to use? // *Ferroelectrics*. 2008. Vol. 375, № 1. P. 19–27. doi: 10.1080/00150190802437746

11. Феноменологическое описание фазовых переходов в тонких пленках BaTiO₃ / В. Б. Широков, Ю. И. Юзюк, Б. Дхил, В. В. Леманов // *Физика твердого тела*. 2008. Т. 50, № 5. С. 889–892.

12. Chen L. Q. Phase-field method of phase transitions/domain structures in ferroelectric thin films: a review // *J. of the American Ceramic Society*. 2008. Vol. 91, № 6. P. 1835–1844. doi: 10.1111/j.1551-2916.2008.02413.x

13. Clarification of size effects in polycrystalline BaTiO₃ thin films by means of the specific heat measurements: grain size or film thickness? / B. A. Strukov, S. T. Davitadze, S. G. Shulman, B. V. Goltzman, V. V. Lemanov // *Ferroelectrics*. 2004. Vol. 301, № 1. P. 157–162. doi: 10.1080/00150190490455674

14. Limpert E., Stahel W. A., Abbt M. Log-normal distributions across the sciences: keys and clues: on the charms of statistics, and how mechanical models resembling gambling machines offer a link to a handy way to characterize log-normal distributions, which can

provide deeper insight into variability and probability-normal or log-normal: that is the question // *BioScience*. 2001. Vol. 51, № 5. P. 341–352. doi: 10.1641/0006-3568(2001)051[0341:LNDATS]2.0.CO;2

15. Chen L. Q. APPENDIX A—Landau free-energy coefficients // *Physics of Ferroelectrics*. 2007. Vol. 105. P. 363–372. doi: 10.1007/978-3-540-34591-6_9

16. He Y. Heat capacity, thermal conductivity, and thermal expansion of barium titanate-based ceramics // *Thermochimica acta*. 2004. Vol. 419, № 1–2. P. 135–141. doi: 10.1016/j.tca.2004.02.008

17. Lobo R., Mohallem N. D. S., Moreira R. L. Grain-Size Effects on Diffuse Phase Transitions of Sol-Gel Prepared Barium Titanate Ceramics // *J. of the American Ceramic Society*. 1995. Vol. 78, № 5. P. 1343–1346. doi: 10.1111/j.1551-2916.1995.tb08492.x

18. Влияние температуры обжига на размер зерен и электрокалорический эффект керамики титаната бария / И. А. Старков, А. С. Анохин, И. Л. Мыльников, М. А. Мишнев, А. С. Старков // *Физика твердого тела*. 2022. Т. 64, № 4. С. 443–454. doi: 10.21883/FTT.2022.04.52184.208

19. Arlt G., Hennings D., De With G. Dielectric properties of fine-grained barium titanate ceramics // *J. of applied physics*. 1985. Vol. 58, № 4. P. 1619–1625. doi: 10.1063/1.336051

Информация об авторах

Старков Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук (1981), доцент научно-образовательного центра математики университета ИТМО. Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – мультиферроики; мультикалорический эффект; флексокалорический эффект; электрокалорический эффект; метод усреднения; доменные стенки; дифракция; фазовые переходы.

Адрес: Университет ИТМО, Кронверкский пр., д. 49 А, Санкт-Петербург, 197101, Россия

E-mail: stark55@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5744-2481>

Анохин Александр Сергеевич – кандидат технических наук (2022), инженер образовательного центра "Энергоэффективные инженерные системы" университета ИТМО. Автор 25 научных работ. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; электрокалорический эффект; пирозлектрический эффект; мультиферроики.

Адрес: Университет ИТМО, Кронверкский пр., д. 49 А, Санкт-Петербург, 197101, Россия

E-mail: aeskow@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0499-4159>

Еськов Андрей Владимирович – кандидат технических наук (2014), старший научный сотрудник кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 52 научных работ. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; электрокалорический эффект; пирозлектрический эффект; мультиферроики; твердотельные преобразователи тепловой энергии.

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

E-mail: asanokhin@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5770-1543>

Семенов Александр Анатольевич – доктор технических наук (2017), заведующий кафедрой физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 125 научных работ. Сфера научных интересов – электроника СВЧ; сегнетоэлектрики; технология тонких пленок; мультиферроики.

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

E-mail: aasemenov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2348-3773>

Холкин Андрей Леонидович – кандидат физико-математических наук (1987), заведующий лабораторией наноразмерных сегнетоэлектрических материалов Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. Автор более 500 научных работ. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; пьезоэлектрики; мультиферроики; тонкие пленки; полярные биоматериалы; сканирующая зондовая микроскопия; микромеханические системы; графен; наноэлектромеханика.

Адрес: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, ул. Мира, д. 19, Екатеринбург, 620002, Россия

E-mail: kholkin@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-3432-7610>

References

1. Sigov A. S., Mishina E. D., Mukhortov V. M. Thin Ferroelectric Films: Obtaining and Perspectives Of Integration. *Physics of Solid State*. 2010, vol. 52, no. 4, pp. 709–717. (In Russ.)
2. Karmanenko S., Semenov A., Dedyk A., Es'kov A. V. New Approaches to Electrocaloric-Based Multilayer Cooling. *Electrocaloric Materials*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2014, pp. 183–223. doi: 10.1007/978-3-642-40264-7_8
3. Valant M. Electrocaloric Materials for Future Solid-State Refrigeration Technologies. *Progress in Materials Science*. 2012, vol. 57, no. 6, pp. 980–1009. doi:10.1016/j.pmatsci.2012.02.001
4. Zhang G., Fan B., Zhao P., Hu Zh., Liu Y., Liu F., Jiang Sh., Zhang S., Li H., Wang Q. Ferroelectric Polymer Nanocomposites With Complementary Nanostructured Fillers for Electrocaloric Cooling with High Power Density and Great Efficiency. *ACS Applied Energy Materials*. 2018, vol. 1, no. 3, pp. 1344–1354. doi: 10.1021/acsae.8b00052
5. Qian X., Han D., Zheng L., Chen J., Tyagi M., Li Q., Du F., Zheng Sh., Huang X., Zhang Sh. et al. High-Entropy Polymer Produces a Giant Electrocaloric Effect at Low Fields. *Nature*. 2021, vol. 600, no. 7890, pp. 664–669. doi: 10.1038/s41586-021-04189-5
6. Bai Y., Ding K., Zheng G.-P., Shi S.-Q., Qiao L. Entropy-Change Measurement of Electrocaloric Effect of BaTiO₃ Single Crystal. *Physica Status Solidi (a)*. 2012, vol. 209, no. 5, pp. 941–944. doi: 10.1002/pssa.201127695
7. Pertsev N. A., Zembilgotov A. G., Tagantsev A. K. Effect of Mechanical Boundary Conditions on Phase Diagrams of Epitaxial Ferroelectric Thin Films. *Physical Review Lett.* 1998, vol. 80, no. 9, p. 1988. doi: 10.1103/PhysRevLett.80.1988
8. Novak N., Pirc R., Kutnjak Z. Diffuse Critical Point in PLZT Ceramics. *Europhysics Lett.* 2013, vol. 102, no. 1, p. 17003. doi: 10.1209/0295-5075/102/17003
9. Lines M. E., Glass A. M. Principles and Applications of Ferroelectrics And Related Materials. Oxford, Oxford university press, 2001, 736 p. doi: 10.1093/acprof:oso/9780198507789.001.0001
10. Tagantsev A. K. Landau Expansion for Ferroelectrics: Which Variable to Use? *Ferroelectrics*. 2008, vol. 375, no. 1, pp. 19–27. doi: 10.1080/00150190802437746
11. Shirokov V. B., Yuzuk Yu. I., Dkhil B., Lemanov V. V. Phenomenological Description of Phase Transitions in Thin Films of BaTiO₃. *Fizika Tverdogo Tela [Physics of Solid State]*. 2008, vol. 50, no. 5, pp. 889–892. (In Russ.)
12. Chen L. Q. Phase-Field Method of Phase Transitions/Domain Structures in Ferroelectric Thin Films: a Review. *J. of the American Ceramic Society*. 2008, vol. 91, no. 6, pp. 1835–1844. doi: 10.1111/j.1551-2916.2008.02413.x
13. Strukov B. A., Davitadze S. T., Shulman S. G., Goltzman B. V., Lemanov V. V. Clarification of Size Effects in Polycrystalline BaTiO₃ Thin Films by Means of the Specific Heat Measurements: Grain Size or Film Thickness? *Ferroelectrics*. 2004, vol. 301, no. 1, pp. 157–162. doi: 10.1080/00150190490455674
14. Limpert E., Stahel W. A., Abbt M. Log-Normal Distributions Across The Sciences: Keys and Clues: on the Charms of Statistics, and How Mechanical Models Resembling Gambling Machines Offer a Link to a Handy Way to Characterize Log-Normal Distributions, Which Can Provide Deeper Insight into Variability and Probability-Normal or Log-Normal: That is the Question. *BioScience*. 2001, vol. 51, no. 5, pp. 341–352. doi: 10.1641/0006-3568(2001)051[0341:LNDATS]2.0.CO;2
15. Chen L. Q. APPENDIX A—Landau Free-Energy Coefficients. *Physics of Ferroelectrics*. 2007, vol. 105, pp. 363–372. doi: 10.1007/978-3-540-34591-6_9
16. He Y. Heat Capacity, Thermal Conductivity, and Thermal Expansion of Barium Titanate-Based Ceramics. *Thermochimica Acta*. 2004, vol. 419, no. 1–2, pp. 135–141. doi: 10.1016/j.tca.2004.02.008
17. Lobo R., Mohallem N. D. S., Moreira R. L. Grain-Size Effects on Diffuse Phase Transitions of Sol-Gel Prepared Barium Titanate Ceramics. *J. of the American Ceramic Society*. 1995, vol. 78, no. 5, pp. 1343–1346. doi: 10.1111/j.1151-2916.1995.tb08492.x
18. Starkov I. A., Anokhin A. S., Myl'nikov I. L., Mishnev M. A., Starkov A. S. Influence of Sintering Temperature on Grain Size and Electrocaloric Effect in Barium Titanate Ceramics. *Physics of Solid State*. 2022, vol. 64, no. 4, pp. 443–454 (In Russ.). doi: 10.21883/FTT.2022.04.52184.208

19. Arlt G., Hennings D., De With G. Dielectric J. of applied physics. 1985, vol. 58, no. 4, pp. 1619–
Properties of Fine-Grained Barium Titanate Ceramics. 1625. doi: 10.1063/1.336051

Information about the authors

Alexander S. Starkov, Cand. Sci. (Phys. and Math.) (1981), Associate Professor of Scientific-educational center of mathematics of ITMO University. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: multiferroics; multicaloric effect; flexocaloric effect; electrocaloric effect; domain walls; diffraction; phase transitions.

Address: ITMO University, 49 A, Kronverkskii Pr., St Petersburg 197101, Russia

E-mail: stark55@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5744-2481>

Alexander S. Anokhin, Cand. Sci. (Eng.) (2022), engineer of educational center "Energy Effective engineering systems" of ITMO University. The author of 25 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; electrocaloric effect; pyroelectric effect; multiferroics.

Address: ITMO University, 49 A, Kronverkskii Pr., St Petersburg 197101, Russia

E-mail: askow@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0499-4159>

Andrey V. Es'kov, Cand. Sci. (Eng.) (2014), Senior Researcher of the Department of physical electronics and technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 52 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; electrocaloric effect; pyroelectric effect; multiferroics.

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

E-mail: asanokhin@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5770-1543>

Alexander A. Semenov, Dr Sci. (Eng.) (2017), Head of the Department of physical electronics and technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 125 scientific publications. Area of expertise: microwave electronics; thin films technology; ferroelectrics; multiferroics.

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

E-mail: aasemenov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2348-3773>

Andrey L. Kholkin, Cand. Sci. (Phys. and Math.) (1987), Head of Nanoscale Ferroelectrics Laboratory (NANOFE) of Ural Federal University. The author of more than 500 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; piezoelectrics; multiferroics, thin films; polar biomaterials; scanning probe microscopy; micromechanical systems; graphene; nanoelectromechanics.

Address: Ural Federal University, 19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia

E-mail: kholkin@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-3432-7610>

Диагностика атмосферных плазменных струй барьерного разряда в потоке аргона и гелия в цилиндрическом СВЧ-резонаторе

А. М. Астафьев[✉], А. М. Альтмарк, Н. А. Лесив, А. С. Чирцов

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

[✉] astafev-aleksandr@yandex.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время активно развиваются технологии, связанные с использованием атмосферной плазмы с низкой газовой температурой. При создании новых источников низкотемпературной плазмы для конкретных приложений возникает необходимость в измерении динамических процессов в нестационарных разрядах с высоким временным разрешением. Одной из наиболее важных характеристик плазмы является концентрация электронов, которая для плазмы атмосферного давления с низкой температурой газа может быть очень небольшой. Однако доступные в настоящее время методы диагностики газоразрядной плазмы либо обладают недостаточной чувствительностью, либо не позволяют отслеживать динамические процессы в нестационарных разрядах. В этой связи представляет интерес разработка новых средств, позволяющих проводить диагностику атмосферной низкотемпературной плазмы.

Цель работы. Разработка метода диагностики атмосферной плазмы с низкой температурой газа и низкой электронной концентрацией в цилиндрическом СВЧ-резонаторе.

Материалы и методы. Предлагаемый метод диагностики основан на известном способе измерения сдвига частоты и добротности собственных мод СВЧ-резонатора, внутри которого находится исследуемая плазма.

Результаты. Выполнена диагностика атмосферных плазменных струй барьерного разряда в потоке гелия и аргона в цилиндрическом СВЧ-резонаторе. Предложенная геометрия позволила существенно увеличить чувствительность измерений. Удалось исключить влияние эффекта поляризационного вырождения мод в круглом цилиндрическом резонаторе. Разработанная система была также апробирована на тестовых объектах с известным значением диэлектрической проницаемости.

Заключение. Разработан метод СВЧ-диагностики стационарных и нестационарных холодных атмосферных плазменных струй в цилиндрическом резонаторе, внутри которого установлены передающая и приемная антенны, а также ортогональный тонкий проводник, обеспечивающий подавление нежелательных мод.

Ключевые слова: СВЧ-резонатор, плазменная струя, барьерный разряд, частота соударения электронов, добротность, поперечно-электрические (ТЕ) моды

Для цитирования: Диагностика атмосферных плазменных струй барьерного разряда в потоке аргона и гелия в цилиндрическом СВЧ-резонаторе / А. М. Астафьев, А. М. Альтмарк, Н. А. Лесив, А. С. Чирцов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 3. С. 122–135. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-122-135

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-22-20065) и Санкт-Петербургского научного фонда (проект № 17/2022).

Статья поступила в редакцию 21.10.2022; принята к публикации после рецензирования 24.05.2023; опубликована онлайн 29.06.2023

Diagnostics of Atmospheric Plasma Jets of Helium and Argon Barrier Discharge in a Cylindrical Microwave Cavity Resonator

Aleksandr M. Astafiev✉, Aleksandr M. Altmark, Nikita A. Lesiv, Alexander S. Chirtsov

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ astafev-aleksandr@yandex.ru

Abstract

Introduction. Technologies related to the use of low-temperature atmospheric plasmas are developing at a rapid pace. Creation of new low-temperature plasma sources for specific applications requires monitoring of dynamic processes in such discharges with a high time resolution. Electron concentration is one of the most important plasma characteristics, which can be very low for a low-temperature atmospheric pressure plasma. However, the methods currently available for diagnostics of gas-discharge plasmas are either characterized by insufficient sensitivity or unable to monitor dynamic processes in non-stationary discharges. In this regard, the development of new diagnostic approaches to low-temperature atmospheric plasma seems to be a relevant research direction.

Aim. To develop a diagnostic method for an atmospheric plasma with a low gas temperature and a low electron concentration in a cylindrical microwave resonator.

Materials and methods. The proposed diagnostic method is based on the well-known principle of measuring the frequency shift and the Q -factor of the eigenmodes of the microwave resonator, inside which the plasma under study is located.

Results. Measurements of the atmospheric barrier discharge plasma jets in a helium and argon stream in a cylindrical microwave resonator were performed. The proposed geometry made it possible to significantly increase the sensitivity of measurements. It became possible to exclude the effect of polarization degeneracy in a round cylindrical resonator. The developed system was also tested on test objects with a known value of permittivity.

Conclusion. A method for microwave diagnostics of stationary and non-stationary cold atmospheric plasma jets in a cylindrical resonator, inside which transmitting and receiving antennas are installed, as well as an orthogonal thin conductor preventing the excitation of undesirable modes, was developed.

Keywords: microwave cavity resonator, plasma jet, barrier discharge, electron collision frequency, Q -factor, transverse electric (TE) modes

For citation: Astafiev A. M., Altmark A. M., Lesiv N. A., Chirtsov A. S. Diagnostics of Atmospheric Plasma Jets of Helium and Argon Barrier Discharge in a Cylindrical Microwave Cavity Resonator. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 3, pp. 122–135. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-122-135

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

Acknowledgements. This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-22-20065) and St Petersburg Science Foundation (project No. 17/2022).

Submitted 21.10.2022; accepted 24.05.2023; published online 29.06.2023

Введение. В настоящее время активно развиваются технологии, основанные на использовании плазмы атмосферного давления с низкой (около 300 K) температурой газа для обработки поверхности полимеров, нанесения покрытий, а также улучшения адгезии лаков, красок, чернил и клеев [1–3]. Еще одна причина повышенного внимания к изучению неравновесной низкотемпературной плазмы атмосферного давления вызвана большими перспективами ее использования в медицине для стерили-

зации и дезинфекции живых тканей [4, 5]. Такие исследования в области плазменной медицины широко проводятся как в нашей стране, так и за рубежом. Кроме того, в настоящее время выходят специальные тематические журналы, посвященные плазменной медицине (Plasma Medicine, Clinical Plasma Medicine).

В основе применяемых на практике устройств обычно используется газоразрядная ячейка, через которую продувается рабочий газ [4–6]. На выходе из разрядной ячейки форми-

руется плазменная струя с характерной длиной несколько сантиметров и диаметром несколько миллиметров. Для генерации плазмы атмосферного давления с низкой температурой газа используются различные типы разрядов, которые обычно не являются стационарными. При создании новых источников низкотемпературной плазмы для конкретных приложений возникает необходимость в измерении динамических процессов в таких разрядах с высоким временным разрешением. Одной из наиболее важных характеристик плазмы является плотность электронов, которая для плазмы атмосферного давления с низкой температурой газа может быть очень небольшой (10^{12} см^{-3} и ниже [7, 21]). Электронная плотность может измеряться различными способами. Однако доступные в настоящее время методы либо обладают недостаточной чувствительностью, либо не позволяют отслеживать динамические процессы в нестационарных разрядах.

Измерение электронной концентрации плазмы атмосферного давления с использованием зондовых методов является очень сложной задачей. Внесение зонда в плазменную струю приводит к сильному ее возмущению, что связано с большой вносимой емкостью и малым сопротивлением зондовой цепи по сравнению с сопротивлением плазменной струи. Это, в свою очередь, приводит к замыканию разряда или плазменной струи на зонд. Эта задача еще больше усложняется при диагностике атмосферной холодной плазмы с низкой электронной концентрацией.

В некоторых работах для оценки электронной концентрации плазмы разряда [8–10] вычислялось его сопротивление по закону Ома. Далее по известным значениям скорости дрейфа электронов и наблюдаемым геометрическим характеристикам разряда выполнялась оценка электронной концентрации. Однако такой подход к оценке электронной плотности имеет некоторые существенные ограничения. Падение напряжения на разрядном промежутке и падение напряжения в плазменном столбе могут сильно отличаться из-за наличия приэлектродного падения напряжения (как, например, катодный слой). Другое важное ограничение этого метода оценки плотности электронов в

плазме связано с тем, что ток в разряде может иметь сильно неоднородное распределение, которое измерить очень сложно (например, струя барьерного разряда в потоке инертных газов [7]). Кроме того, для нестационарных разрядов можно оценить только среднюю концентрацию электронов (за период приложенного напряжения) без возможности измерения ее зависимости от времени [10].

Одним из наиболее эффективных методов диагностики газоразрядной плазмы является метод томсоновского рассеяния лазерного излучения на свободных электронах [11, 12]. Такой подход характеризуется очень хорошим пространственным разрешением (до нескольких десятков микрометров), что позволяет использовать его для диагностики микроразрядов [12] и плазменных струй атмосферного давления с характерными размерами в несколько миллиметров [13]. Однако этот метод имеет ограниченную чувствительность и его трудно использовать при измерении атмосферной плазмы с концентрацией электронов менее 10^{13} см^{-3} . Кроме того, такой подход из-за низкого уровня регистрируемого сигнала требует длительного его накопления (десятки миллисекунд), что не позволяет использовать его при исследовании нестационарных разрядов.

Другой известный метод измерения электронной концентрации плазмы основан на том, что штарковское уширение разных линий поразному зависит от электронной плотности и температуры. Сравнение двух или более линий позволяет получить одновременно данные об электронной концентрации и температуре с очень высоким временным разрешением (вплоть до пикосекунд). Этот метод успешно использовался при исследовании плазмы атмосферного давления в разрядах различного типа [14–16]. Однако использование этого метода для измерения электронной концентрации в холодных атмосферных плазменных струях является непростой задачей, так как при малых значениях электронной концентрации сильно усложняется анализ уширения спектральных линий [16].

Широко известны методы измерения электронной концентрации плазмы, которые основаны на взаимодействии электромагнитных волн с плазмой. В настоящее время имеется

большое количество работ, посвященных исследованию путем зондирования радиоволнами в широком диапазоне частот как ионосферной, так и газоразрядной плазмы. Однако среди них очень мало работ по исследованию атмосферной низкотемпературной плазмы, которая может быть использована в медицине, а также для обработки термочувствительных материалов. Один из описанных в литературе методов исследования атмосферной плазмы, который также успешно использовался для исследования плазмы низкого давления, основан на регистрации рассеянного от исследуемой области плазмы СВЧ-сигнала частотой 10...11 ГГц [7, 17–21]. В этих работах исследуемая область плазмы с размерами меньше длины волны зондирующего сигнала размещалась между двух рупорных антенн на некотором удалении от них. При определении электронной плотности плазмы разряда измерялся уровень рассеянного сигнала с использованием специальной процедуры калибровки: измерение уровня сигнала, рассеянного от объекта с аналогичной геометрией и известной диэлектрической проницаемостью. Этот метод, обладающий очень высоким временным разрешением, успешно применялся для диагностики импульсного разряда между двумя электродами в воздухе [19], а также струи барьерного [7] и униполярного импульсного [21] разряда в потоке гелия. Недостатком данного метода является зондирование плазмы в свободном пространстве, поскольку в этом случае сильное влияние могут оказывать различные внешние факторы (подводящие провода питания разряда, элементы конструкции разрядной ячейки и прочие предметы), воздействие которых еще более существенно при измерении плазмы с очень низкой электронной концентрацией. Кроме того, этот метод позволяет измерять только среднюю плотность электронов без возможности проведения какой-либо оценки распределения электронной плотности вдоль неоднородных разрядов и плазменных струй.

Предлагаемый метод диагностики атмосферных плазменных струй с низкими температурой газа и электронной концентрацией основан на известном способе измерения сдвига частоты и добротности собственных мод СВЧ-

резонатора [22–30]. Этот метод СВЧ-диагностики еще с середины прошлого века широко используется для измерения характеристик диэлектрических материалов [22, 23, 29] и газоразрядной плазмы низкого давления [25, 26, 30], но ранее не применялся для таких специфических объектов, как холодные атмосферные плазменные струи. Данный метод позволит получать более точные результаты, чем метод, основанный на рассеянии СВЧ-сигнала в свободном пространстве [7, 18, 19 и 21], а также даст возможность измерять распределение электронной плотности вдоль протяженных неоднородных разрядов и плазменных струй. Данная работа является продолжением исследований, начатых в [28].

Описание метода диагностики. Идея использованного метода диагностики состоит в следующем. В СВЧ-резонатор, который имеет набор собственных мод с определенными частотами f_k и добротностями Q_k , помещается исследуемый объект (газоразрядная плазма). Электрические характеристики исследуемой среды определяются путем измерения смещения собственных частот $\tilde{f}_k$ и изменения добротностей $\tilde{Q}_k$ собственных мод СВЧ-резонатора. Если наблюдаемые изменения собственных частот и добротностей невелики, то для определения электрических характеристик свойств среды можно использовать известную теорию возмущения, согласно которой проводимость σ и относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_m исследуемой среды определяются выражениями [29, 30, 33]

$$\frac{f_k - \tilde{f}_k}{f_k} = \frac{\int_V (\epsilon_m - 1) |E_k|^2 dV}{2 \int_V |E_k|^2 dV}; \quad (1)$$

$$\left(\frac{1}{Q_k} - \frac{1}{\tilde{Q}_k} \right) = - \frac{\int_V \sigma |E_k|^2 dV}{2\pi f_k \epsilon_0 \int_V |E_k|^2 dV}, \quad (2)$$

где v – объем исследуемой области плазмы; V – объем СВЧ-резонатора; E_k – электрическое поле k -й моды СВЧ-резонатора; ϵ_0 – электри-

ческая постоянная. Относительная диэлектрическая проницаемость ε_m , проводимость σ и относительная комплексная диэлектрическая проницаемость ε'_m связаны известным соотношением $\varepsilon'_m = \varepsilon_m + \frac{i\sigma}{2\pi f \varepsilon_0}$ (для временной зависимости $e^{-i2\pi f t}$). Частоты f_k и $\tilde{f}_k$ соответствуют максимумам измеренных спектральных характеристик. Значения добротностей Q_k и $\tilde{Q}_k$ также могут быть оценены из спектральных данных с помощью соотношения $Q_k = f_k / \Delta f_{3\text{ dB}}$, где $\Delta f_{3\text{ dB}}$ – ширина полосы частот резонансной кривой по уровню половинной мощности. Относительная диэлектрическая проницаемость ε_m и проводимость σ холодной плазмы могут быть выражены через электронную концентрацию n_e , частоту соударений электронов ν_{ef} и частоту электромагнитного поля $f = \omega / (2\pi)$ [31, 32]:

$$\varepsilon_m = 1 - \frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m_e (\nu_{ef}^2 + \omega^2)};$$

$$\sigma = \frac{\nu_{ef} n_e e^2}{m_e (\nu_{ef}^2 + \omega^2)}, \quad (3)$$

где e и m_e – заряд и масса электрона; ω – циклическая частота электромагнитного поля.

Данный метод диагностики позволяет измерять зависимости электрических характеристик от времени. Временное разрешение этого метода можно связать со временем убывания энергии k -й моды от некоторого начального значения W_0 по закону $W(t) = W_0 e^{-t/\tau}$ или ее нарастания до конечного значения W_0 по закону $W(t) = W_0 (1 - e^{-t/\tau})$, где t – момент времени; $\tau = \frac{Q_k}{\pi f_k}$. Величина τ пропорциональна добротности используемой моды, но в проведенных экспериментах она не превышала 130 нс.

Низкотемпературные атмосферные плазменные струи характеризуются очень низким значением электронной концентрации, которое не пре-

вышает 10^{13} см^{-3} . При атмосферном давлении частота соударения электронов составляет более 1 ТГц. Согласно (3) плазма с такими низкими значениями электронной концентрации и высокими значениями частоты соударения электронов имеет проводимость десятки–сотни миллисименс на метр [мСм/м]. Кроме того, если объем плазменных струй много меньше объема используемого СВЧ-резонатора, то они будут не очень сильно изменять собственные частоты и добротности резонатора. В этом случае использование теории возмущения вполне оправданно.

Описание экспериментальной установки.

Описанный подход может быть использован для диагностики разрядов атмосферного давления с очень низкой плотностью электронов и размерами, много меньше размеров СВЧ-резонатора. Для максимальной чувствительности необходимо выбрать оптимальную геометрию СВЧ-резонатора, моду, а также расположение исследуемого объекта и зондирующих антенн внутри СВЧ-резонатора. Для этой цели была изготовлена специальная экспериментальная установка (рис. 1).

Основным элементом системы является цилиндрический СВЧ-резонатор 1 диаметром $2a = 150$ мм (a – радиус резонатора) и изменяемой длиной L от 280 до 480 мм. Для изменения длины резонатора осуществляется продольное перемещение его оснований. Внутри резонатора размещены две одинаковые зондирующие

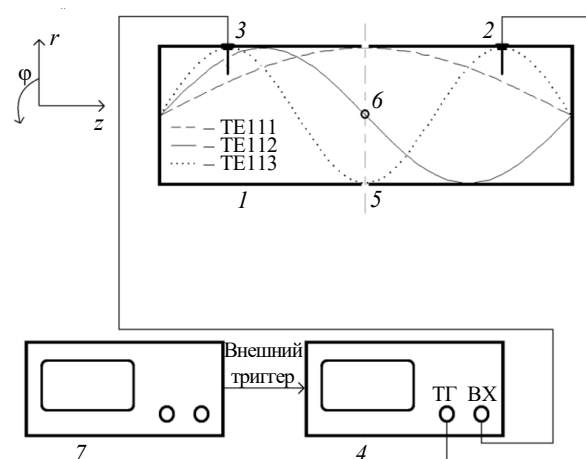


Рис. 1. Экспериментальная установка. Кривые соответствуют распределению радиальной компоненты электрического поля первых трех собственных ТЕ-мод

Fig. 1. Experimental setup. The curves correspond to the distribution of the radial component of the electric field of the first three proper TE modes

антенны 2, 3 длиной 30 мм, подключенные к анализатору спектра 4. Анализатор спектра содержит два разъема: один для входа (ВХ), а другой – для выхода отслеживающего генератора (трекинг-генератора – ТГ). Таким образом, одна из антенн является излучающей и возбуждает собственные моды в заданной полосе частот, в то время как другая является приемной и регистрирует спектр возбужденных в резонаторе собственных мод. Используемый в работе анализатор спектра (Rigol DSA815-TG) способен работать на частотах до 1.5 ГГц. В этом диапазоне частот в резонаторе могут возбуждаться только первые три поперечно-электрические моды (TE₁₁₁, TE₁₁₂ и TE₁₁₃) с частотами [33]

$$f_k = \frac{1}{2\pi\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \sqrt{\left(\frac{\chi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2}, \quad (4)$$

где $n=1, 2, 3$; $\chi=1.841$. Электрическое поле этих первых трех мод имеет две компоненты:

$$E_r = -\frac{1}{r} \omega E_0 J_1\left(\chi \frac{r}{a}\right) \sin \varphi \sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right); \quad (5)$$

$$E_\varphi = \omega E_0 J_1'\left(\chi \frac{r}{a}\right) \cos \varphi \sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right), \quad (6)$$

где r , φ , z – цилиндрические координаты (рис. 1); E_0 – амплитуда; $J_1\left(\chi \frac{r}{a}\right)$ и $J_1'\left(\chi \frac{r}{a}\right)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка и ее производная. Зависимости радиальных компонент электрического поля $E_r(z)$ для первых трех мод (вдоль СВЧ-резонатора) представлены на рис. 1. Для обеспечения максимальной чувствительности исследуемый объект должен быть расположен вблизи одного из максимумов радиальной компоненты электрического поля этих мод. Для проведения диагностики можно использовать моды TE₁₁₁, TE₁₁₂ и TE₁₁₃. Предполагается, что поперечные размеры исследуемого объекта существенно меньше его длины, и он размещается внутри резонатора параллельно антеннам (в направлении радиальной компоненты электрического поля) через два отверстия диаметром 10 мм в стенке резонатора 5. Малость поперечных раз-

меров исследуемого объекта по сравнению с размерами резонатора позволяет не учитывать угловую составляющую электрического поля E_φ при вычислении интегралов в числителе в выражениях (1) и (2). Для исключения возбуждения моды другой поляризации в резонаторе имеется специальное отверстие 6, через которое вставляется тонкий металлический проводник длиной 30 мм, препятствующий появлению нежелательной моды, но в то же время почти не влияющий на основные (рабочие) моды. Проводник и исследуемая область плазмы находились в одной плоскости и были ортогональны друг другу. Еще одной особенностью используемой экспериментальной установки является то, что момент запуска анализатора спектра синхронизирован с моментом запуска развертки осциллографа, что позволяет осуществлять синхронную регистрацию спектра с сигналами разрядного тока и напряжения.

Генерация исследуемой плазменной струи осуществлялась с помощью ячейки барьерного разряда (рис. 2). Основным элементом этой ячейки является кварцевая трубка 1 с внешним диаметром 7 мм и толщиной стенки 1 мм, через которую продувается гелий или аргон. Один из

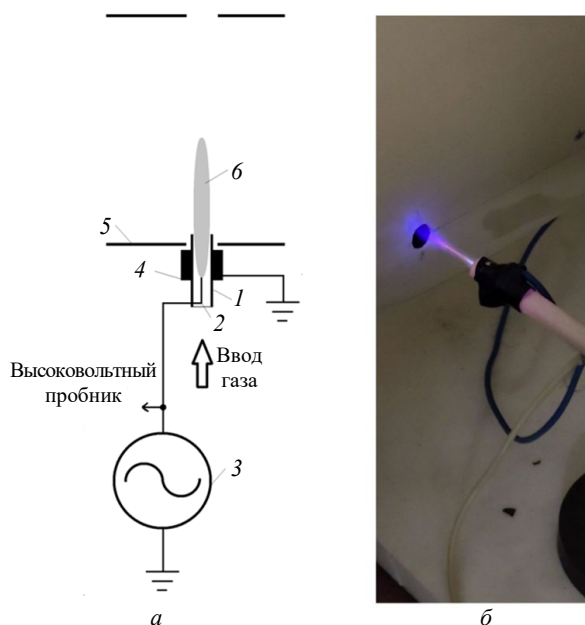


Рис. 2. Конфигурация разрядной ячейки (а); изображение плазменной струи барьерного разряда в потоке гелия (б)

Fig. 2. Configuration of the discharge cell (a); image of the helium dielectric barrier discharge plasma jet (b)

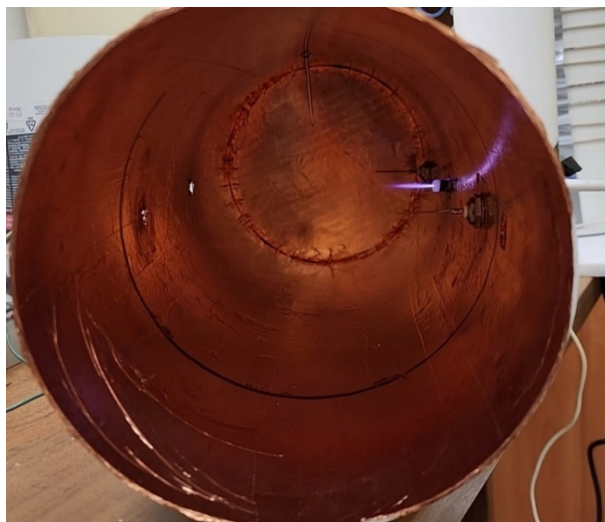


Рис. 3. Изображение плазменной струи барьерного разряда в потоке аргона внутри цилиндрического СВЧ-резонатора

Fig. 3. Image of the helium dielectric barrier discharge plasma jet inside the microwave cavity resonator

электродов диаметром 1.2 мм расположен вдоль оси трубки 2. Питание подается от импульсно-модулированного источника 3 с частотой 160 кГц. Второй заземленный кольцевой электрод 4 установлен на внешней стороне кварцевой трубки и находится у отверстия в стенке резонатора 5. За областью разрядной ячейки (внутри СВЧ-резонатора) формируется плазменная струя 6. Для иллюстрации на рис. 3 представлено изображение внутреннего пространства СВЧ-резонатора, где видно расположение зондирующих линейных антенн, плазменной струи и тонкого линейного проводника, который расположен ортогонально зондирующим антеннам и исследуемой плазменной струе.

Настройка резонатора и пробные измерения. Перед проведением измерений параметров атмосферных плазменных струй был измерен спектр для пустого резонатора, а также выполнены тестовые измерения характеристик объектов с известными значениями диэлектрической проницаемости.

На рис. 4 представлена спектральная характеристика пустого резонатора длиной $L = 480$ мм для случая с тонким поперечным проводником длиной 30 мм (красная кривая) и без него (синяя кривая). Из рис. 4 видно, что помимо основных максимумов трех ТЕ-мод в спектре для цилиндрического резонатора также наблюдаются характерные пики, которые

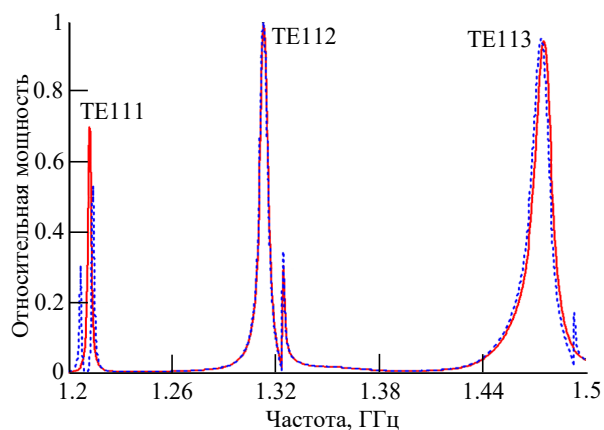


Рис. 4. Спектры мод TE111, TE112 и TE113 для СВЧ-резонатора без дополнительного поперечного проводника (синяя кривая) и для СВЧ-резонатора с тонким металлическим проводником (красная кривая)

Fig. 4. The spectra of the TE111, TE112 and TE113 modes for the microwave cavity without an additional transverse conductor (blue curve) and for the microwave cavity with a thin metal conductor (red curve)

меньше основных максимумов. Наличие этих дополнительных пиков связано с небольшой (около 1 %) овальностью формы резонатора. В цилиндрическом СВЧ-резонаторе наблюдается поляризационное вырождение собственных значений. Небольшая овальность резонатора приводит к устранению этого вырождения и появлению дополнительных пиков. На рис. 4 хорошо видно, что при введении в резонатор тонкого проводника дополнительные пики для мод TE111 и TE113 полностью исчезают, тогда как основные максимумы почти не изменяются. Этот проводник не влияет на моду TE112, так как в этой точке электрическое поле моды TE112 для двух поляризаций равно нулю. Таким образом, использование дополнительных проводников достаточно эффективно для устранения возбуждения нежелательных мод.

Другой особенностью спектра на рис. 4 является то, что мода TE111 обладает наибольшей добротностью, которая равна 550 ± 10 . Добротность мод TE112 и TE113 не превышает 150 [28]. При длине резонатора 280 мм в диапазоне частот до 1.5 ГГц возбуждается только TE111-мода. Уменьшение длины резонатора также увеличивает отношение объема исследуемого объекта к объему резонатора, что согласно (1) и (2) повышает чувствительность измерений. Дальнейшие измерения проводились при минимальной длине резонатора 280 мм

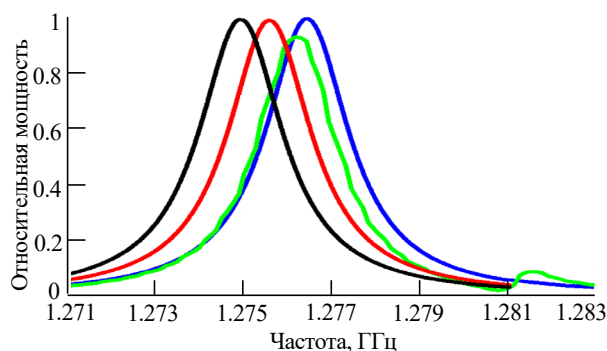


Рис. 5. Спектр моды TE111 для пустого резонатора с дополнительным поперечным проводником (синяя кривая), для пустого резонатора без дополнительного поперечного проводника (зеленая кривая), для резонатора с фторопластовым брусом (красная кривая) и для резонатора с кварцевой трубкой (черная кривая)

Fig. 5. Spectra of the TE111 mode for the empty microwave cavity resonator with an additional transverse conductor (blue curve), for the cavity without an additional transverse conductor (green curve), for the cavity with a PTFE bar (red curve) and for the cavity with a quartz tube (black curve)

(при дальнейшем уменьшении длины возникает опасность замыкания плазменной струи на возбуждающую или приемную антенну). Простота настройки рабочих мод в нужной полосе частот путем перемещения его оснований объясняет использование TE-мод.

В качестве тестовых объектов были использованы фторопластовый брусок шириной 8 мм и толщиной 3 мм, а также кварцевая трубка с внешним диаметром 7 мм и толщиной стенки 1 мм. На рис. 5 представлены спектры TE111-моды для цилиндрического резонатора длиной 280 мм. Синяя кривая соответствует пустому резонатору с дополнительным поперечным проводником. Пустому резонатору без дополнительного поперечного проводника соответствует зеленая кривая, которая иллюстрирует эффект выравнивания спектра TE111-моды. Остальные две кривые соответствуют резонаторам с вставленными внутрь на одинаковую длину 75 мм фторопластовым брусом (красная кривая) и кварцевой трубкой (черная кривая). По сдвигу собственной частоты согласно (1) можно определить диэлектрическую проницаемость фторопластового бруска и кварцевой трубки, которая получается равной 2.2 и 3.6 соответственно. Полученные значения вполне удовлетворительно согласуются с известными данными для этих материалов.

Анализ плазменных струй барьерного

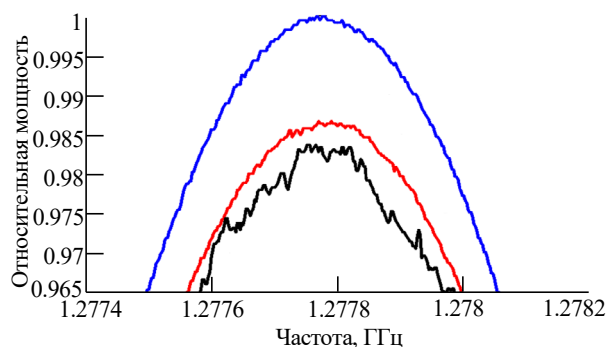


Рис. 6. Спектр моды TE111 для резонатора без плазменной струи (синяя кривая), с плазменной струей в потоке гелия (красная кривая) и с плазменной струей в потоке аргона (черная кривая)

Fig. 6. Spectra of the TE111 mode for the microwave cavity without a plasma jet (blue curve), with a helium dielectric barrier discharge plasma jet (red curve) and with an argon dielectric barrier discharge plasma jet (black curve)

разряда в потоке гелия и аргона. Измерения плазменных струй осуществлялись в цилиндрическом резонаторе длиной 280 мм, в котором возбуждалась TE111-мода.

На рис. 6 представлены спектры TE111-моды для резонатора без плазменной струи (синяя кривая), а также с плазменной струей барьерного разряда в потоках гелия (красная кривая) и аргона (черная кривая) при питании разряда от источника частотой 160 кГц и амплитудой 3 кВ без модуляции. На выходе разрядной ячейки формировались плазменные струи, видимая область которых была длиной около 30 мм и диаметром около 3 мм. Как можно видеть из рис. 6, при зажигании плазменных струй (красная и черная кривая) добротность уменьшается существенно, тогда как заметного сдвига частоты для обоих случаев не наблюдается. Это не позволяет одновременно определить электронную концентрацию плазмы и частоту соударений электронов. Очень малое значение частотного сдвига является следствием того, что частота соударения электронов для атмосферной плазмы на три порядка выше частоты зондирующего сигнала. В этом случае можно определить только среднее по объему значение проводимости анализируемой области плазмы, а концентрацию электронов можно вычислить с использованием дополнительных данных из литературы для значения частоты соударения электронов, которая зависит от давления и типа газа, но почти не зависит от электронной концентра-

ции газоразрядной плазмы [31]. В представленных на рис. 6 случаях значение средней проводимости для плазменной струи в потоке гелия составляло примерно 15 мСм/м, а для плазменной струи в потоке аргона около 25 мСм/м.

Когда изменение частоты в эксперименте не регистрируется, анализатор спектра можно перевести в режим измерения одной частоты (zero span mode). В этом режиме анализатор спектра будет регистрировать временную зависимость сигнала на выбранной частоте (в максимуме), а минимальное время сканирования уменьшится с 10 мс до 20 мкс. Такая временная зависимость напрямую связана с изменением добротности соответствующей моды и средней проводимостью исследуемой плазмы. Время сканирования зависимостей на рис. 6 составляло 10 мс.

Поскольку частота источника питания была довольно высокой (160 кГц), плазма отдельных пробоев барьерного разряда не успевала релаксировать до возникновения следующих. Этот факт хорошо иллюстрируется на рис. 6. Если бы частота источника питания была значительно меньше, то время между отдельными пробоями было бы больше. Это привело бы к тому, что красная и черная кривые в окрестности максимумов имели бы большое количество отдельных импульсов, синхронных с импульсами тока в моменты возникновения отдельных пробоев барьерного разряда (как это ранее наблюдалось в [28] при питании от высоковольтного источника частотой 50 кГц). Также из рис. 6 можно сделать вывод о том, что плазменная струя в потоке гелия имела более стабильный характер горения, чем плазменная струя в потоке аргона.

Для изучения динамических процессов в плазменных струях анализатор спектра был настроен на режим измерения одной частоты, а питание разрядной ячейки осуществлялось от импульсно-модулированного источника с частотой 160 кГц. Использование такого источника позволило определить зависимость средней проводимости плазменной струй от времени в моменты включения и выключения питающего напряжения.

На рис. 7 и 8 представлены временные зависимости мощности TE₁₁₁-моды в моменты выключения напряжения питания для плазменной струи барьерного разряда в потоках гелия

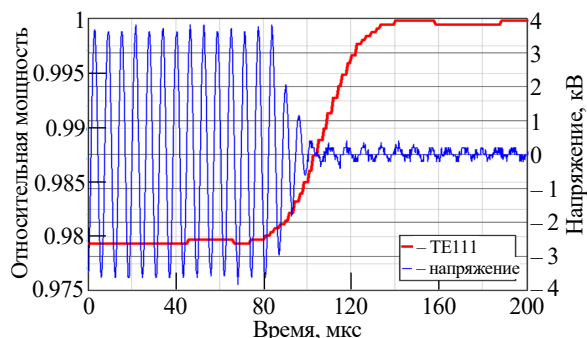


Рис. 7. Временная зависимость мощности TE₁₁₁-моды (красная кривая) при выключении питающего напряжения (синяя кривая) для плазменной струи в потоке гелия

Fig. 7. Time dependence of the TE₁₁₁ mode power (red curve) for a helium barrier discharge plasma jet powered by the pulse modulated voltage (blue curve)

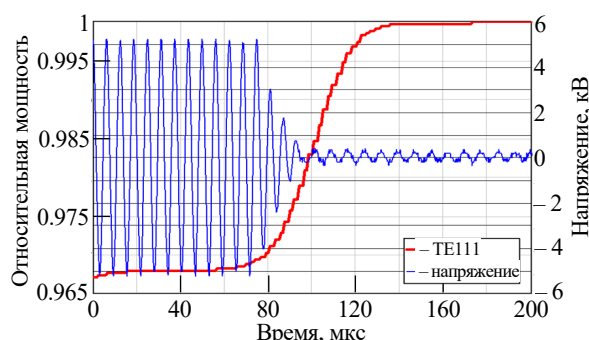


Рис. 8. Временная зависимость мощности TE₁₁₁-моды (красная кривая) при выключении питающего напряжения (синяя кривая) для плазменной струи в потоке аргона

Fig. 8. Time dependence of the TE₁₁₁ mode power (red curve) for an argon barrier discharge plasma jet powered by the pulse modulated voltage (blue curve)

(рис. 7) и аргона (рис. 8) с соответствующими синхронно снятыми зависимостями напряжения на разрядной ячейке. Причина довольно медленного (за несколько циклов) убывания напряжения питания объясняется использованием в высоковольтном источнике резонансного трансформатора. Из представленных на рис. 7 и 8 зависимостей мощности TE₁₁₁-моды видно, что до момента выключения высоковольтного источника наблюдаются лишь небольшие случайные их изменения в течение одного периода напряжения питания. Этот факт указывает на то, что добротность также не меняется в течение одного периода напряжения питания. Путем использования выражений (2), (4)–(6) можно определить среднюю проводимость плазменных струй, длина которых составляет 30 мм и диаметр 3 мм. Для случаев на рис. 7 и 8 значения средней проводимости для плазменных струй в потоке гелия и аргона составляют, соответ-

ственно, 27 и 45 мСм/м. После начала убывания питающего напряжения средняя проводимость также уменьшается (соответствует возрастанию красных зависимостей на рис. 7 и 8), однако для обоих случаев плазменных струй ее убывание существенно медленнее уменьшения осцилляций напряжения питания. После исчезновения разряда наблюдаются лишь случайные изменения временных зависимостей TE111-моды, но эти случайные изменения не превышают нескольких процентов от полной их вариации от момента начала убывания напряжения на разрядной ячейке до полного прекращения разряда. Такая высокая чувствительность может позволить выполнить оценку зависимости проводимости плазменной струи от ее длины путем постепенного продвижения в резонатор.

Заключение. Описанная система СВЧ-диагностики в цилиндрическом резонаторе позволяет измерять среднюю проводимость холодных стационарных и нестационарных плазменных струй. Благодаря использованию TE111-моды и дополнительного проводника, препятствующего возбуждению нежелательных мод, удалось добиться низкого уровня шумов измеряемого сигнала (несколько процентов). Для многих приложений знание одной только

проводимости может быть вполне достаточным. Так, например, при нетермической обработке различных термочувствительных поверхностей контроль проводимости может быть необходим для предотвращения неконтролируемого увеличения тока разряда и последующего резкого повышения температуры. При необходимости определения электронной концентрации и ее распределения вдоль плазменной струи можно воспользоваться известными из литературы данными для эффективной частоты соударения электронов, которая зависит от давления и типа газа, но почти не зависит от электронной концентрации плазмы. Однако такой подход является очень приближенным, поскольку в атмосферной плазменной струе выдуваемый газ смешивается с атмосферным воздухом с разной пропорцией в разных областях струи. Для одновременного определения электронной концентрации и частоты соударения электронов необходимо еще больше повышать чувствительность измерительной системы. Предварительные оценки показывают, что для используемой TE111-моды ожидаемый сдвиг частоты при зажигании описанных плазменных струй барьерного разряда в потоке гелия и аргона будет менее 1 кГц.

Авторский вклад

Александр Михайлович Астафьев – общая постановка задачи, построение аналитической модели.

Александр Моисеевич Альтмарк – обработка экспериментальных данных.

Никита Андреевич Лесив – проведение экспериментов.

Александр Сергеевич Чирцов – формирование общей структуры статьи и ее редакция.

Author's contribution

Aleksandr M. Astafiev, general formulation of the problem, construction of an analytical model.

Aleksandr M. Altmark, processing of experimental data.

Nikita A. Lesiv, conducting experiments.

Alexander S. Chirtsov, formation of the general structure of the article and its editing.

Список литературы

1. Surface Treatment of Polyethylene Terephthalate to Improving Hydrophilicity Using Atmospheric Pressure Plasma Jet / Z. Fang, J. Yang, Y. Liu, T. Shao, C. Zhang // IEEE Transactions on Plasma Science. 2013. Vol. 41, № 6. P. 1627–1634. doi: 10.1109/TPS.2013.2259508

2. Ohkubo Y., Endo K., Yamamura K. Adhesive-free adhesion between heat-assisted plasma-treated fluoropolymers (PTFE, PFA) and plasma-jet-treated polydimethylsiloxane (PDMS) and its application // Scientific Reports. 2018. Vol. 8, № 18058. P. 1–11. doi: 10.1038/s41598-018-36469-y

3. Fang Z., Yang H., Qiu Y. Surface Treatment of Polyethylene Terephthalate Films Using a Microsecond Pulse Homogeneous Dielectric Barrier Discharges in Atmospheric Air // IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. Vol. 38, № 7. P. 1615–1623. doi: 10.1109/TPS.2010.2048342

4. Atmospheric-pressure plasma sources for biomedical applications / G. Y. Park, S. J. Park, M. Y. Choi, I. G. Koo, J. H. Byun, J. W. Hong, J. Y. Sim, G. J. Collins, J. K. Lee // Plasma Sources Science and Technology. 2012. Vol. 21, № 4. P. 043001. doi: 10.1088/0963-0252/21/4/043001

5. Fridman A., Friedman G. Plasma Medicine. Chichester: John Wiley & Sons Limited, 2013. 526 p.
6. Winter J., Brandenburg R., Weltmann K.-D. Atmospheric pressure plasma jets: an overview of devices and new directions // Plasma Sources Science and Technology. 2015. Vol. 24, № 6. P. 064001. doi: 10.1088/0963-0252/24/6/064001
7. Shashurin A., Keidar M. Experimental approaches for studying non-equilibrium atmospheric plasma jets // Phys. Plasmas. 2015. Vol. 22, № 12. P. 122002. doi: 10.1063/1.4933365
8. Balcon N., Aanesland A., Boswell R. Pulsed RF Discharges, Glow and Filamentary Mode at Atmospheric Pressure in Argon // Plasma Sources Sci. Technol. 2007. Vol. 16, № 2. P. 217–225. doi: 10.1088/0963-0252/16/2/002
9. Pai D., Lacoste D., Laux C. Nanosecond repetitively pulsed discharge in air at atmospheric pressure – spark regime // Plasma Sources Sci. Technol. 2010. Vol. 19, № 6. P. 065015. doi: 10.1088/0963-0252/19/6/065015
10. Rajendra Shrestha Dr., Reeta Shilpakar Er., Deepak Prasad Subedi Dr. Measurement of Electron Density in Atmospheric Pressure Cold Argon Plasma Jet // Intern. J. of Recent Research and Review. 2019. Vol. XII, iss. 2. P. 27–33.
11. Marshall K. A., Hieftje G. M. Measurement of true gas kinetic temperatures in an inductively coupled plasma by laser-light scattering // Plenary lecture J. of Analytical Atomic Spectrometry. 1987. Iss. 6. P. 567–571. doi: 10.1039/JA9870200567
12. Measurement of electron temperature and density in an argon microdischarge by laser Thomson scattering / S. G. Belostotskiy, R. Khandelwal, Q. Wang, V. M. Donnelly, D. J. Economou, N. Sadeghi // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 92, iss. 22. P. 221507. doi: 10.1063/1.2939437
13. Laser scattering on an atmospheric pressure plasma jet: disentangling Rayleigh, Raman and Thomson scattering / A. F. H. van Gessel, E. A. D. Carbone, P. J. Bruggeman, J. J. A. M. van der Mullen // Plasma Sources Science and Technology. 2012. Vol. 21, № 1. P. 015003. doi: 10.1088/0963-0252/21/1/015003
14. Atmospheric pressure cold argon/oxygen plasma jet assisted by preionization by syringe needle electrode / M. Qian, C. Ren, D. Wang, Y. Feng and J. Zhang // 2012 Abstracts IEEE Intern. Conf. on Plasma Science. Edinburgh, UK, 08–13 July 2012. IEEE, 2012. P. 5B-9–5B-9. doi: 10.1109/PLASMA.2012.6383989
15. Qiuping Zhou, Cheng Cheng, Yuedong Meng. Electron Density and Temperature Measurement by Stark Broadening in a Cold Argon Arc-Plasma Jet at Atmospheric Pressure // Plasma Science and Technology. 2009. Vol. 11, № 5. P. 560. doi: 10.1088/1009-0630/11/5/09
16. Electron density measurement in atmospheric pressure plasma jets: Stark broadening of hydrogenated and non-hydrogenated lines / A. Yu. Nikiforov, Ch. Leys, M. A. Gonzalez, J. L. Walsh // Plasma Sources Science and Technology. 2015. Vol. 24, № 3. P. 034001. doi: 10.1088/0963-0252/24/3/034001
17. Shneider M. N., Miles R. B. Microwave diagnostics of small plasma objects // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 98, iss. 3. Art. № 033301. doi: 10.1063/1.1996835
18. Counting the electrons in a multiphoton ionization by elastic scattering of microwaves / A. Sharma, M. N. Slipchenko, M. N. Shneider, X. Wang, K. A. Rahman, A. Shashurin // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. Art. № 2874. doi: 10.1038/s41598-018-21234-y
19. Time-Resolved Measurements of Electron Density in Nanosecond Pulsed Plasmas Using Microwave Scattering / X. Wang, P. Stockett, R. Jagannath, S. Bane and A. Shashurin // Plasma Source Sci. Technol. 2018. Vol. 27, № 7. Art. № 07LT02. doi: 10.1088/1361-6595/aacc06
20. Thomson microwave scattering for electron number density diagnostics of miniature plasmas at low pressure / Xingxing Wang, Apoorv Ranjan, M. N. Shneider, A. Shashurin; American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). Dallas, Texas, 17–21 June 2019. doi: 10.2514/6.2019-3250
21. Wang X., Shashurin A. Study of atmospheric pressure plasma jet parameters generated by DC voltage driven cold plasma source // J. Appl. Phys. 2017. Vol. 122, iss. 6. Art. № 063301. doi: 10.1063/1.4986636
22. Townes C. H., Schawlow A. L. Microwave Spectroscopy. New York: Dover Publication, 1975.
23. Gordy W., Smith W. V., Trambarulo R. F. Microwave spectroscopy. New York: John Wiley & Sons, 1953. 446 p.
24. Dielectric microwave resonators in TE₀₁₁ cavities for electron paramagnetic resonance spectroscopy / R. R. Mett, J. W. Sidabras, I. S. Golovina, J. S. Hyde // Review of Scientific Instruments. 2008. Vol. 79, iss. 9. Art. № 094702. doi: 10.1063/1.2976033
25. EUV-Induced Plasma: A Peculiar Phenomenon of a Modern Lithographic Technology / J. Beckers, T. van de Ven, R. van der Horst, D. Astakhov, V. Bannine // Appl. Sci. 2019. Vol. 9, iss. 14. Art. № 2827. doi: 10.3390/app9142827
26. Agdur B., Enander B. Resonances of a Microwave Cavity Partially Filled with a Plasma // J. of Applied Physics. 1962. Vol. 33, iss. 2. P. 575–581. doi: 10.1063/1.1702469
27. Townes C. H., Schawlow A. L. Microwave Spectroscopy. New York: Dover Publication, 1975. 720 p.
28. The Possibility of Measuring Electron Density of Plasma at Atmospheric Pressure by a Microwave Cavity Resonance Spectroscopy / J. Li, A. M. Astafiev, A. A. Kudryavtsev, C. Yuan, Z. Zhou, X. Wang // IEEE Transactions on Plasma Science. 2021. Vol. 49, iss. 3. P. 1001–1008. doi: 10.1109/TPS.2021.3050110
29. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1963. 404 с.
30. Голант В. Е. Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. М.: Наука, 1968. 110 с.
31. Raizer Y. P. Gas Discharge Physics. New York: Springer-Verlag, 1991. 449 p.

32. Ginzburg V. L. The propagation of electromagnetic waves in plasmas. Oxford: Pergamon Press, 1970. 615 p.

33. Pozar D. M. Microwave Engineering. 3rd ed. Danvers: John Wiley & Sons Inc., 2005. 700 p.

Информация об авторах

Астафьев Александр Михайлович – кандидат физико-математических наук (2017), доцент (2020) кафедры физики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 80 научных работ. Сфера научных интересов – физика газового разряда; радиофизика; физика волновых процессов.

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

E-mail: astafev-aleksandr@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7387-097X>

Альтмарк Александр Моисеевич – кандидат физико-математических наук (2005), доцент (2005) кафедры физики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 60 научных работ. Сфера научных интересов – акустика; физика волновых процессов; физика газового разряда.

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

E-mail: alexaltmark@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1912-7573>

Лесив Никита Андреевич – магистр (2018), ассистент (2021) кафедры физики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 20 научных работ. Сфера научных интересов – физика волновых процессов; физика газового разряда.

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

E-mail: nick.lesiv@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3498-8198>

Чирцов Александр Сергеевич – доктор физико-математических наук (2014), заведующий кафедрой физики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 120 научных работ. Сфера научных интересов – фотоника; физика газового разряда.

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

E-mail: alex_chirtsov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7703-5469>

References

1. Fang Z., Yang J., Liu Y., Shao T., Zhang C. Surface Treatment of Polyethylene Terephthalate to Improving Hydrophilicity Using Atmospheric Pressure Plasma Jet. IEEE Transactions on Plasma Science. 2013, vol. 41, no. 6, pp. 1627–1634. doi: 10.1109/TPS.2013.2259508

2. Ohkubo Y., Endo K., Yamamura K. Adhesive-free Adhesion between Heat-Assisted Plasma-Treated Fluoropolymers (PTFE, PFA) and Plasma-Jet-Treated Polydimethylsiloxane (PDMS) and Its Application. Scientific Reports. 2018, vol. 8, art. num. 18058, pp. 1–11. doi: 10.1038/s41598-018-36469-y

3. Fang Z., Yang H., Qiu Y. Surface Treatment of Polyethylene Terephthalate Films Using a Microsecond Pulse Homogeneous Dielectric Barrier Discharges in Atmospheric Air. IEEE Transactions on Plasma Science. 2010, vol. 38, no. 7, pp. 1615–1623. doi: 10.1109/TPS.2010.2048342

4. Park G. Y., Park S. J., Choi M. Y., Koo I. G., Byun J. H., Hong J. W., Sim J. Y., Collins G. J., Lee J. K. Atmospheric-Pressure Plasma Sources for Biomedical Applications. Plasma Sources Science and Technology. 2012, vol. 21, no. 4, p. 043001. doi: 10.1088/0963-0252/21/4/043001

5. Fridman A., Friedman G. Plasma Medicine. Chichester, John Wiley & Sons Limited, 2013, 526 p.

6. Winter J., Brandenburg R., Weltmann K.-D. Atmospheric Pressure Plasma Jets: an Overview of Devices and New Directions. Plasma Sources Science and Technology. 2015, vol. 24, no. 6, p. 064001. doi: 10.1088/0963-0252/24/6/064001

7. Shashurin A., Keidar M. Experimental Approaches for Studying Non-Equilibrium Atmospheric Plasma Jets. Phys. Plasmas. 2015, vol. 22, no. 12, p. 122002. doi: 10.1063/1.4933365

8. Balcon N., Aanesland A., Boswell R. Pulsed RF Discharges, Glow and Filamentary Mode at Atmospheric Pressure in Argon. Plasma Sources Sci. Technol. 2007, vol. 16, no. 2, pp. 217–225. doi: 10.1088/0963-0252/16/2/002

9. Pai D., Lacoste D., Laux C. Nanosecond Repetively Pulsed Discharge in Air at Atmospheric Pressure – Spark Regime. Plasma Sources Sci. Technol. 2010, vol. 19, no. 6, art. num. 065015. doi: 10.1088/0963-0252/19/6/065015

10. Rajendra Shrestha Dr., Reeta Shilpakar Er., Deepak Prasad Subedi Dr. Measurement of Electron

Диагностика атмосферных плазменных струй барьерного разряда в потоке аргона и гелия ж

в цилиндрическом СВЧ-резонаторе

Diagnostics of Atmospheric Plasma Jets of Helium and Argon Barrier Discharge
in a Cylindrical Microwave Cavity Resonator

Density in Atmospheric Pressure Cold Argon Plasma Jet. Intern. J. of Recent Research and Review. 2019, vol. XII, iss. 2, pp. 27–33.

11. Marshall K. A., Hieftje G. M. Measurement of True Gas Kinetic Temperatures in an Inductively Coupled Plasma by Laser-Light Scattering. Plenary Lecture J. of Analytical Atomic Spectrometry. 1987, iss. 6, pp. 567–571. doi: 10.1039/JA9870200567

12. Belostotskiy S. G., Khandelwal R., Wang Q., Donnelly V. M., Economou D. J., Sadeghi N. Measurement of Electron Temperature and Density in an Argon Microdischarge by Laser Thomson Scattering. Applied Physics Letters. 2008, vol. 92, iss. 22, p. 221507. doi: 10.1063/1.2939437

13. Gessel A. F. H., Carbone E. A. D., Bruggeman P. J., van der Mullen J. J. A. M. Laser Scattering on an Atmospheric Pressure Plasma Jet: Disentangling Rayleigh, Raman and Thomson Scattering. Plasma Sources Science and Technology. 2012, vol. 21, no. 1, p. 015003. doi: 10.1088/0963-0252/21/1/015003

14. Qian M., Ren C., Wang D., Feng Y., Zhang J. Atmospheric Pressure Cold Argon/Oxygen Plasma Jet Assisted by Preionization by Syringe Needle Electrode. 2012 Abstracts IEEE Intern. Conf. on Plasma Science. Edinburgh, UK, 08–13 July 2012. IEEE, 2012, pp. 5B-9–5B-9. doi: 10.1109/PLASMA.2012.6383989

15. Qiuping Zhou, Cheng Cheng, Yuedong Meng. Electron Density and Temperature Measurement by Stark Broadening in a Cold Argon Arc-Plasma Jet at Atmospheric Pressure. Plasma Science and Technology. 2009, vol. 11, no. 5, p. 560. doi: 10.1088/1009-0630/11/5/09

16. Nikiforov A. Yu., Leys Ch., Gonzalez M. A., Walsh J. L. Electron Density Measurement in Atmospheric Pressure Plasma Jets: Stark Broadening of Hydrogenated and Non-Hydrogenated Lines. Plasma Sources Science and Technology. 2015, vol. 24, no. 3, p. 034001. doi: 10.1088/0963-0252/24/3/034001

17. Shneider M. N., Miles R. B. Microwave Diagnostics of Small Plasma Objects. J. Appl. Phys. 2005, vol. 98, iss. 3, p. 033301. doi: 10.1063/1.1996835

18. Sharma A., Slipchenko M. N., Shneider M. N., Wang X., Rahman K. A., Shashurin A. Counting the Electrons in a Multiphoton Ionization by Elastic Scattering of Microwaves. Scientific Reports. 2018, vol. 8, art. num. 2874. doi: 10.1038/s41598-018-21234-y

19. Wang X., Stockett P., Jagannath R., Bane S., Shashurin A. Time-Resolved Measurements of Electron Density in Nanosecond Pulsed Plasmas Using Microwave Scattering. Plasma Source Sci. Technol. 2018, vol. 27, no. 7, art. num. 07LT02. doi: 10.1088/1361-6595/aacc06

20. Xingxing Wang, Apoorv Ranjan, Shneider M. N., Shashurin A. Thomson Microwave Scattering for Electron Number Density Diagnostics of Miniature Plasmas at Low Pressure. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). Dallas, Texas, 17–21 June 2019. doi: 10.2514/6.2019-3250

21. Wang X., Shashurin A. Study of Atmospheric Pressure Plasma Jet Parameters Generated by DC Voltage Driven Cold Plasma Source. J. Appl. Phys. 2017, vol. 122, iss. 6, art. num. 063301. doi: 10.1063/1.4986636

22. Townes C. H., Schawlow A. L. Microwave Spectroscopy. New York, Dover Publication, 1975.

23. Gordy W., Smith W. V., Trambarulo R. F. Microwave spectroscopy. New York, John Wiley & Sons, 1953, 446 p.

24. Mett R. R., Sidabras J. W., Golovina I. S., Hyde J. S. Dielectric Microwave Resonators in TE₀₁₁ Cavities for Electron Paramagnetic Resonance Spectroscopy. Review of Scientific Instruments. 2008, vol. 79, iss. 9, art. num. 094702. doi: 10.1063/1.2976033

25. Beckers J., van de Ven T., van der Horst R., Astakhov D., Banine V. EUV-Induced Plasma: A Peculiar Phenomenon of a Modern Lithographic Technology. Appl. Sci. 2019, vol. 9, iss. 14, art. num. 2827. doi: 10.3390/app9142827

26. Agdur B., Enander B. Resonances of a Microwave Cavity Partially Filled with a Plasma. J. of Applied Physics. 1962, vol. 33, iss. 2, pp. 575–581. doi: 10.1063/1.1702469

27. Townes C. H., Schawlow A. L. Microwave Spectroscopy. New York, Dover Publication, 1975, 720 p.

28. Li J., Astafiev A. M., Kudryavtsev A. A., Yuan C., Zhou Z., Wang X. The Possibility of Measuring Electron Density of Plasma at Atmospheric Pressure by a Microwave Cavity Resonance Spectroscopy. IEEE Transactions on Plasma Science. 2021, vol. 49, iss. 3, pp. 1001–1008. doi: 10.1109/TPS.2021.3050110

29. Brandt A. A. *Issledovanie dielektrikov na sverkhvysokikh chastotakh* [Investigation of dielectrics at microwave frequencies]. Moscow, *Phyzzmatgiz*, 1963, 404 p. (In Russ.)

30. Golant V. E. *Sverkhvysokochastotnye metody issledovaniya plazmy* [Microwave Methods for Plasma Research]. Moscow, *Nauka*, 1968, 110 p.

31. Raizer Y. P. Gas Discharge Physics. New York, Springer-Verlag, 1991, 449 p.

32. Ginzburg V. L. The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas. Oxford, Pergamon Press, 1970, 615 p.

33. Pozar D. M. Microwave Engineering. 3rd ed. John Wiley & Sons Inc., 2005, 700 p.

Information about the authors

Aleksandr M. Astafiev, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2017), Associate Professor (2020) at the Department of Physics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 80 scientific publications. Area of expertise: gas discharge physics; radiophysics; physics of wave processes.

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

E-mail: astafev-aleksandr@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7387-097X>

Aleksandr M. Altmark, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2005), Associate Professor (2005) at the Department of Physics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 60 scientific publications. Area of expertise: acoustics; physics of wave processes; gas discharge physics.

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

E-mail: alexaltmark@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1912-7573>

Nikita A. Lesiv, Master's Degree (2018), Assistant (2021) of the Department of Physics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 20 scientific publications. Area of expertise: acoustics; physics of wave processes; gas discharge physics.

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

E-mail: nick.lesiv@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3498-8198>

Alexander S. Chirtsov, Dr Sci. (Phys.-Math.) (2014), Head of the Department of Physics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 120 scientific publications. Area of expertise: photonics; gas discharge physics.

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

E-mail: alex_chirtsov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3498-8198>

ПАМЯТИ ИРИНЫ БОРИСОВНЫ ВЕНДИК



Профессор И. Б. Вендик
(15.05.1936 – 09.05.2023)

9 мая 2023 г. ушла из жизни ученый с мировым именем, д. ф.-м. н., профессор Ирина Борисовна Вендик, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, почетный работник электронной промышленности СССР.

Ирина Борисовна родилась 15 мая 1936 г. в г. Фергана (Узбекская ССР).

По окончании в 1959 г. Ленинградского электротехнического института им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности "Электронные приборы" Ирина Борисовна осталась работать на своей выпускающей кафедре радиотехнической электроники (ныне кафедра микроволновой электроники) в должности младшего научного сотрудника. В 1961 г. она поступила в аспирантуру, а в 1964 г. стала ассистентом кафедры.

Защитив в 1966 г. кандидатскую диссертацию, Ирина Борисовна перешла на новую, организованную в 1967 г. кафедру микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры, на которой впоследствии проработала более 50 лет, сперва в должности доцента, а позже –

профессора. В 1968 г. И. Б. Вендик было присвоено ученое звание доцента. Преподавательскую деятельность она совмещала с активной научно-исследовательской работой. В состав ее научной группы всегда входили студенты, аспиранты и молодые ученые.

В 1970–80-х гг. основные научные интересы Ирины Борисовны концентрируются в области разработки СВЧ-устройств на $p-i-n$ -диодах и пионерских исследований динамического нелинейного транспорта в низкоразмерных структурах (квазиодномерных кристаллах) с волнами зарядовой плотности. Результатами этих работ стали знаменитая монография по интегральным СВЧ-фазовращателям и переключателям на $p-i-n$ -диодах, написанная в соавторстве с Г. С. Хижой (будущим генеральным директором НПО "Светлана") и Е. А. Серебряковой, кандидатские диссертации сотрудников лаборатории СВЧ-микроэлектроники, которую возглавляла Ирина Борисовна, а также ее собственная докторская диссертация, защищенная в 1990 г. в ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР.

Открытие в 1986 г. явления высокотемпературной сверхпроводимости дало мощный импульс новому направлению фундаментальных и прикладных исследований во всем мире. После защиты докторской диссертации и присвоения в 1993 г. ученого звания профессора это научное направление стало одним из главных в жизни Ирины Борисовны на следующие 15 лет. Вместе с сотрудниками своей лаборатории она активно включилась в исследования применений высокотемпературных сверхпроводников для создания СВЧ-устройств с предельно низким уровнем вносимых потерь. В этот период Ирина Борисовна со своим мужем и коллегой – профессором Орестом Генриховичем Вендиком – каждый год в течение двух месяцев работала по приглашению в Чалмерском техническом университете (г. Гётеборг, Швеция), выполняя совместные исследования по данной тематике. Одним из результатов стала трехтомная монография на английском языке "High

Temperature Superconductor Devices for Microwave Signal Processing" под редакцией профессора Эрика Кольберга. Тогда же усилиями этих трех профессоров был организован международный студенческий семинар по применению новых физических явлений и технологий на СВЧ и в оптическом диапазоне, который ежегодно проводился с 1994 по 2010 г. в разных странах мира: Швеции, России, Франции, Германии, Финляндии, Великобритании, Ирландии.

Десятки научных публикаций, множество международных научных конференций самого высокого уровня, зарубежные заказчики и партнеры, приглашенные лекции в ведущих мировых университетах и научных центрах, защиты кандидатских диссертаций учениками были неотъемлемыми составляющими жизни Ирины Борисовны в этот период. За исследования и разработку СВЧ-устройств на высокотемпературных сверхпроводниках, выполненные под руководством профессора И. Б. Вендик, ее ученикам: И. А. Колмакову, Я. А. Колмакову, Д. В. Холодняку и П. Н. Юдину была присуждена Государственная премия Российской Федерации 2003 г. для молодых ученых за выдающиеся работы в области науки и техники.

В конце 1990-х гг. в лаборатории Ирины Борисовны появилось еще одно новое научное направление: многослойные интегральные схемы СВЧ на основе низкотемпературной совместно-обжигаемой керамики (LTCC). Работы по созданию малогабаритных СВЧ-устройств и модулей, выполняемых по технологии LTCC, велись в партнерстве с коллегами из университетов Финляндии и Германии и были пионерскими для России. Когда эта технология стала востребована отечественной промышленностью, Ирина Борисовна и ее сотрудники начали охотно делиться своими знаниями и опытом, проводили семинары на предприятиях, выступали с приглашенными докладами и лекциями, организовали программу повышения квалификации "Проектирование СВЧ-устройств, выполненных с применением LTCC-технологии", которая пользовалась неизменным спросом у работников промышленных предприятий. Богатый опыт, накопленный коллективом И. Б. Вендик за 15 лет работы в данной области, был

обобщен в монографии под ее редакцией, вышедшей в 2013 г.

Многолетняя научная деятельность Ирины Борисовны всегда была связана с исследованиями всевозможных новых явлений и свойств, главным образом, в нетрадиционных материалах. XXI в. принес новые вызовы и задачи по этой части. В 2004 г. лаборатория профессора И. Б. Вендик стала единственным российским участником крупного международного научно-исследовательского проекта "Metamorphose", который объединил усилия 23 университетов и исследовательских организаций со всей Европы, направленные на исследования и применения электромагнитных метаматериалов – искусственных структур, демонстрирующих свойства отрицательной диэлектрической проницаемости и (или) отрицательной магнитной проницаемости. В это время под руководством Ирины Борисовны в лаборатории велись работы по созданию метаматериалов различных типов: трехмерных (включая полностью диэлектрические), двумерных (метаповерхности) и одномерных (искусственные длинные линии с отрицательной частотной дисперсией). На основе этих структур были созданы новые устройства с улучшенными техническими характеристиками и расширенными функциональными возможностями (широкополосные, многополосные и частотно-перестраиваемые устройства) для применений в СВЧ- и терагерцовом диапазонах. Полученные результаты были опубликованы в виде большого количества журнальных статей и докладов на ведущих международных научных конференциях, легли в основу нескольких кандидатских и одной докторской диссертации. В 2009 г. в издательстве CRC-Press вышла двухтомная монография на английском языке "Metamaterials Handbook", написанная участниками проекта "Metamorphose" и охватывающая все темы теории и приложений электромагнитных метаматериалов. Авторство нескольких глав в этой монографии принадлежит И. Б. Вендик и сотрудникам ее лаборатории.

Ирина Борисовна принимала активное участие в создании и проведении Международного конгресса по искусственным электромагнитным материалам и метаматериалам, была чле-

ном управляющего комитета конгресса. Первый конгресс "Metamaterials 2007" состоялся в Риме. С тех пор конгресс проводится ежегодно. Это крупнейшая мировая конференция в данной области знаний. В 2012 г. конгресс по метаматериалам прошел в Санкт-Петербурге. Ирина Борисовна и ее сотрудники приняли непосредственное участие в организации этого знакового мероприятия.

Профессор И. Б. Вендик была одним из основателей международного виртуального института по метаматериалам и искусственным электромагнитным материалам и являлась бесменным представителем СПбГЭТУ "ЛЭТИ" в данной ассоциации.

Параллельно в этот же период (2004–2014) в лаборатории Ирины Борисовны велись работы по разработке новых устройств радиочастотной идентификации (RFID) и беспроводной передачи энергии (WPT), исследованию наноструктурированных пленок сегнетоэлектриков для создания управляемых СВЧ-устройств на основе перестраиваемых резонаторов на поверхностных акустических волнах (европейский проект "Nanostar"), моделированию свойств интерфейса металл-оксид-полимер для устройств микро- и наноэлектроники (европейский проект "Nanointerface"), разработке многополосных и электронно-реконфигурируемых СВЧ-устройств для беспроводных систем нового поколения (европейский проект "Multiwaves").

В последние годы Ирину Борисовну привлекала тематика беспроводного мониторинга параметров состояния биологических объектов в микроволновом диапазоне для дистанционной диагностики заболеваний, бесконтактного контроля и оценки состояния организма человека. Предметом исследований было изучение распространения электромагнитных волн СВЧ-диапазона через различные участки человеческого тела, в том числе для обнаружения признаков остеопороза и диагностики степени поражения костной ткани.

За свою карьеру И. Б. Вендик стала автором и соавтором более 200 статей в российских и международных научных журналах и множе-

ства публикаций в сборниках трудов международных научных конференций. Ее работы получили широкое международное признание. Ирина Борисовна пользовалась заслуженным авторитетом не только в России, но и в мировых научных кругах. Она была членом Нью-Йоркской академии наук, старшим членом международного Института инженеров в области электротехники и электроники (IEEE), членом Европейской микроволновой ассоциации (EuMA). Входила в редколлегии нескольких авторитетных международных научных журналов, в том числе IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique, International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering (Wiley) и Metamaterials (Elsevier). Принимала активное участие в работе многих ведущих международных научных конференций в качестве члена программного комитета, приглашенного докладчика и организатора секций.

Научные результаты Ирины Борисовны всегда находили отражение в ее преподавательской деятельности. За время работы в СПбГЭТУ "ЛЭТИ" ею были поставлены следующие дисциплины: "Физические основы микроэлектроники"; "Физико-технологические основы микроэлектроники"; "Инженерная микроэлектроника"; "Криоэлектроника СВЧ"; "Колебания и волны"; "Микроэлектроника СВЧ"; "СВЧ-устройства систем телекоммуникаций"; "Метаматериалы для СВЧ- и терагерцовых применений". Она неоднократно приглашалась для чтения лекций в зарубежные университеты: университет г. Оулу (Финляндия), университет г. Лиможа (Франция), университет г. Вупперталь (Германия), университет г. Карлсруэ (Германия), университет Цинхуа (г. Пекин, КНР) и др.

Студенты и аспиранты, работавшие под руководством профессора И. Б. Вендик, неоднократно становились обладателями различных наград и грантов: стипендий Президента Российской Федерации, стипендий Правительства Российской Федерации, стипендий и грантов Правительства Санкт-Петербурга и др. Из стен ее лаборатории вышло множество квалифицированных специалистов, работающих ныне в разных городах России и стран СНГ, а также в

зарубежных странах: Бельгии, Великобритании, Германии, Ирландии, Нидерландах, США, Финляндии, Франции, Швеции. Ученики Ирины Борисовны работают в том числе в международных компаниях, таких как Ericsson, NXP, LG Electronics, IMEC. Под руководством профессора И. Б. Вендик подготовлено 2 доктора наук и более 20 кандидатов наук.

И. Б. Вендик награждена медалью ордена "За заслуги перед Отечеством I степени" (2008).

Ирина Борисовна Вендик прожила долгую, насыщенную и яркую жизнь, которую она почти полностью посвятила служению науке. Ее уход – это невосполнимая потеря для всего академического сообщества и большая личная утрата для всех, кто ее знал. Память об этом замечательном человеке – учителе, наставнике, коллеге, друге – навсегда сохранится в наших сердцах!

Кафедра микрорадиоэлектроники
и технологии радиоаппаратуры
и кафедра микроволновой электроники
СПбГЭТУ "ЛЭТИ"

Правила для авторов статей

В редакцию журнала "Известия вузов России. Радиоэлектроника" необходимо представить:

- распечатку рукописи (1 экз.) – твердую копию файла статьи, подписанную всеми авторами (объем оригинальной статьи не менее 8 страниц, обзорной статьи не более 20 страниц);
- электронную копию статьи;
- отдельный файл для каждого рисунка и каждой таблицы в формате тех редакторов, в которых они были подготовлены. Размещение рисунка в электронной копии статьи не освобождает от его представления отдельным файлом;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (1 экз.);
- сведения об авторах и их электронную копию (на русском и английском языках) (1 экз.);
- рекомендацию кафедры (подразделения) к опубликованию (следует указать предполагаемую рубрику) (1 экз.);
- сопроводительное письмо (1 экз.).

Принимаются к публикации статьи на русском и английском языках.

Рукопись не может быть опубликована, если она не соответствует предъявляемым требованиям и материалам, представляемым с ней.

Структура научной статьи

Авторам рекомендуется придерживаться следующей структуры статьи:

- Заголовочная часть:

- УДК (выравнивание по левому краю);
- название статьи;
- авторы (перечень авторов – Ф. И. О. автора (-ов) полностью. Инициалы ставятся перед фамилиями, после каждого инициала точка и пробел; инициалы не отрываются от фамилии. Если авторов несколько – Ф. И. О. разделяются запятыми), если авторов больше 3, необходимо в конце статьи указать вклад каждого в написание статьи;
- место работы каждого автора и почтовый адрес организации. Если авторы относятся к разным организациям, то после указания всех авторов, относящихся к одной организации, дается ее наименование, а затем список авторов, относящихся ко второй организации, наименование второй организации, и т. д.;
- аннотация – 200–250 слов, характеризующих содержание статьи;
- ключевые слова – 5–7 слов и/или словосочетаний, отражающих содержание статьи, разделенных запятыми; в конце списка точка не ставится;
- источник финансирования – указываются источники финансирования (гранты, совместные проекты и т. п.). Не следует использовать сокращенные названия институтов и спонсирующих организаций;
- благодарности. В данном разделе выражается признательность коллегам, которые оказывали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес статьи. Прежде чем выразить благодарность, необходимо заручиться согласием тех, кого планируете поблагодарить;
- конфликт интересов – авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи. Например, «Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов». Если конфликт интересов возможен, то необходимо пояснение (см. <https://publicationethics.org>).

- Заголовочная часть на английском языке:

- название (Title);

- авторы (Authors);
 - место работы каждого автора (Affiliation). Необходимо убедиться в корректном (согласно уставу организации) написании ее названия на английском языке. Перевод названия возможен лишь при отсутствии англоязычного названия в уставе. Если авторы относятся к разным организациям, то после указания всех авторов, относящихся к одной организации, дается ее наименование, затем приводится список авторов, относящихся ко второй организации, наименование второй организации, и т. д.;
 - аннотация (Abstract);
 - ключевые слова (Keywords);
 - источник финансирования (Acknowledgements);
 - конфликт интересов (Conflict of interest).
- Текст статьи.
 - Приложения (при наличии).
 - Авторский вклад. Если авторов больше 3, необходимо указать вклад каждого в написание статьи.
 - Список литературы (библиографический список);
 - Информация об авторах.

Название статьи должно быть информативным, с использованием основных терминов, характеризующих тему статьи, и четко отражать ее содержание в нескольких словах. Хорошо сформулированное название – гарантия того, что работа привлечет читательский интерес. Следует помнить, что название работы прочтут гораздо больше людей, чем ее основную часть.

Авторство и место в перечне авторов определяется договоренностью последних. При примерно равном авторском вкладе рекомендуется алфавитный порядок.

Аннотация представляет собой краткое описание содержания изложенного текста. Она должна отражать актуальность, постановку задачи, пути ее решения, фактически полученные результаты и выводы. Содержание аннотации рекомендуется представить в структурированной форме:

Введение. Приводится общее описание исследуемой области, явления. Аннотацию не следует начинать словами «Статья посвящена...», «Цель настоящей статьи...», так как вначале надо показать необходимость данного исследования в силу пробела в научном знании, почему и зачем проведено исследование (описать кратко).

Цель работы. Постановка цели исследования (цель может быть заменена гипотезой или исследовательскими вопросами).

Материалы и методы. Обозначение используемой методологии, методов, процедуры, где, как, когда проведено исследование и пр.

Результаты. Основные результаты (приводятся кратко с упором на самые значимые и привлекательные для читателя/научного сообщества).

Обсуждение (Заключение). Сопоставление с другими исследованиями, описание вклада исследования в науку.

В аннотации не следует упоминать источники, использованные в работе, пересказывать содержание отдельных разделов.

При написании аннотации необходимо соблюдать особый стиль изложения: избегать длинных и сложных предложений, выражать мысли максимально кратко и четко. Составлять предложения только в настоящем времени и только от третьего лица.

Рекомендуемый объем аннотации – 200–250 слов.

Ключевые слова – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования. Рекомендуемое количество ключевых слов/фраз – 5–7, количество слов внутри ключевой фразы – не более 3.

Текст статьи излагается в определенной последовательности. Рекомендуется придерживаться формата IMRAD (Introduction, Methods, Results, Discussion; Введение, Методы, Результаты, Обсуждение):

Введение. Во введении автор знакомит с предметом, задачами и состоянием исследований по теме публикации; при этом необходимо обязательно ссылаться на источники, из которых берется информация. Автор приводит описание "белых пятен" в проблеме или того, что еще не сделано, и формулирует цели и задачи исследования.

В тексте могут быть применены сноски, которые нумеруются арабскими цифрами. В сносках могут быть размещены: ссылки на анонимные источники из Интернета, ссылки на учебники, учебные пособия, ГОСТы, авторефераты, диссертации (если нет возможности процитировать статьи, опубликованные по результатам диссертационного исследования).

Методы. Необходимо описать теоретические или экспериментальные методы исследования, используемое оборудование и т. д., чтобы можно было оценить и/или воспроизвести исследование. Метод или методологию проведения исследования целесообразно описывать в том случае, если они отличаются новизной.

Научная статья должна отображать не только выбранный инструментарий и полученные результаты, но и логику самого исследования или последовательность рассуждений, в результате которых получены теоретические выводы. По результатам экспериментальных исследований целесообразно описать стадии и этапы экспериментов.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. В описании полученных результатов не должно быть никаких пояснений – они даются в разделе «Обсуждение».

Обсуждение (Заключение и Выводы). В этой части статьи авторы интерпретируют полученные результаты в соответствии с поставленными задачами исследования, приводят сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Необходимо показать, что статья решает научную проблему или служит приращению нового знания. Можно объяснять полученные результаты на основе своего опыта и базовых знаний, приводя несколько возможных объяснений. Здесь излагаются предложения по направлению будущих исследований.

Список литературы (библиографический список) содержит сведения о цитируемом, рассматриваемом или упоминаемом в тексте статьи литературном источнике. В список литературы включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов и монографии).

Список литературы должен иметь не менее 15 источников (из них, при наличии, не более 20 % – на собственные работы), имеющих статус научных публикаций.

Приветствуются ссылки на современные англоязычные издания (требования МНБД Scopus – 80 % цитируемых англоязычных источников).

Ссылки на неопубликованные и нетиражированные работы не допускаются. Не допускаются ссылки на учебники, учебные пособия, справочники, словари, диссертации и другие малотиражные издания.

Если описываемая публикация имеет цифровой идентификатор Digital Object Identifier (DOI), его необходимо указывать в самом конце библиографической ссылки в формате "doi: ...". Проверять наличие DOI статьи следует на сайте: <http://search.crossref.org> или <https://www.citethisforme.com>.

Нежелательны ссылки на источники более 10–15-летней давности, приветствуются ссылки на современные источники, имеющие идентификатор doi.

За достоверность и правильность оформления представляемых библиографических данных авторы несут ответственность вплоть до отказа в праве на публикацию.

Аннотация на английском языке (Abstract) в русскоязычном издании и международных базах данных является для иностранных читателей основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и изложенных в ней результатах исследований. Зарубежные специалисты по аннотации оценивают публикацию, определяют свой интерес к работе российского ученого, могут использовать ее в своей публикации и сделать на нее ссылку, открыть дискуссию с автором.

Текст аннотации должен быть связным и информативным. При написании аннотации рекомендуется использовать Present Simple Tense. Present Perfect Tense является допустимым. Рекомендуемый объем – 200–250 слов.

Список литературы (References) для зарубежных баз данных приводится полностью отдельным блоком, повторяя список литературы к русскоязычной части. Если в списке литературы есть ссылки на иностранные публикации, то они полностью повторяются в списке, готовящемся в романском алфавите. В References совершенно недопустимо использовать российский ГОСТ 7.0.5–2008. Библиографический список представляется с переводом русскоязычных источников на латиницу. При этом применяется транслитерация по системе BSI (см. <http://ru.translit.net/?account=bsi>).

Типовые примеры описания в References приведены на сайте журнала <https://re.eltech.ru>.

Сведения об авторах

Включают для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание (с датами присвоения и присуждения), почетные звания (с датами присвоения и присуждения), краткую научную биографию, количество печатных работ и сферу научных интересов (не более 5–6 строк), название организации, должность, служебный и домашний адреса, служебный и домашний телефоны, адрес электронной почты. Если ученых и/или академических степеней и званий нет, то следует указать место получения высшего образования, год окончания вуза и специальность. Также требуется включать идентификационный номер исследователя ORCID (Open Researcher and Contributor ID), который отображается как адрес вида <http://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>. При этом важно, чтобы кабинет автора в ORCID был заполнен информацией об авторе, имел необходимые сведения о его образовании, карьере, другие статьи. Вариант «нет общедоступной информации» при обращении к ORCID не допускается. В сведениях следует указать автора, ответственного за прохождение статьи в редакции.

Правила оформления текста

Текст статьи подготавливается в текстовом редакторе Microsoft Word. Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля – верхнее, левое и нижнее 2.5 см, правое 2 см; колонтитулы – верхний 2 см, нижний 2 см. Применение полужирного и курсивного шрифтов допустимо при крайней необходимости.

Дополнительный, поясняющий текст следует выносить в подстрочные ссылки при помощи знака сноски, а при большом объеме – оформлять в виде приложения к статье. Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) – в квадратных прямых.

Все сведения и текст статьи набираются гарнитурой "Times New Roman"; размер шрифта 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 номенклатуре научных специальностей:

2.2 – Электроника, фотоника, приборостроение и связь:

- 2.2.1 – Вакуумная и плазменная электроника.
- 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.
- 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.
- 2.2.4 – Приборы и методы измерения (по видам измерений).
- 2.2.5 – Приборы навигации.
- 2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.
- 2.2.7 – Фотоника.
- 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.
- 2.2.9 – Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры.
- 2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение.
- 2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы.

- 2.2.12 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения.
- 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.
- 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.
- 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.
- 2.2.16 – Радиолокация и радионавигация.

Указанные специальности представляются в журнале следующими основными рубриками:

"Радиотехника и связь":

- Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов.
- Проектирование и технология радиоэлектронных средств.
- Телевидение и обработка изображений.
- Электродинамика, микроволновая техника, антенны.
- Системы, сети и устройства телекоммуникаций.
- Радиолокация и радионавигация.

"Электроника":

- Микро- и наноэлектроника.
- Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника.
- Радиофотоника.
- Электроника СВЧ.

"Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы":

- Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн.
- Метрология и информационно-измерительные приборы и системы.
- Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий.

Адрес редакционной коллегии: 197022, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5 литера Ф, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", редакция журнала "Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника"

Технические вопросы можно выяснить по адресу radioelectronic@yandex.ru

Известия высших учебных заведений России. **РАДИОЭЛЕКТРОНИКА**
Journal of the Russian Universities. **RADIOELECTRONICS**

Том 26 № 3 2023

Vol. 26 No. 3 2023

Научные редакторы А. М. Мончак, П. В. Апалина
Редакторы Э. К. Долгатов, И. Г. Скачек
Компьютерная верстка М. И. Поповой,
Е. И. Третьяковой

Science Editors A. M. Monchak, P. V. Apalina
Editors E. K. Dolgatov, I. G. Skachek
DTP Professional M. I. Popova
E. I. Tretyakova

Подписано в печать 29.06.23. Формат 60×84 1/8.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Уч.-изд. л. 18.85. Печ. л. 18.25. Тираж 300 экз. (1-й завод 1–150 экз.) Заказ 90.

Цена свободная.

Signed to print 29.06.23. Sheet size 60×84 1/8.

Educational-ed. liter. 18.85. Printed sheets 18.25. Number of copies 300.

Printing plant 1–150 copies. Order no. 90.

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